

Univerzita Karlova v Praze

Přírodovědecká fakulta

Geologie

Geotechnologie



Jan Podolník

**Bezkontaktní měření vodivosti mělkých částí geologického
prostředí**

**Contactless conductometry for shallow parts of geological
medium**

Bakalářská práce

Vedoucí závěrečné práce: PhDr. RNDr. Jiří Dohnal

Praha 2014

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze, 15. 8. 2014

Podpis

Poděkování:

Tímto bych rád poděkoval PhDr. RNDr. Jiřímu Dohnalovi za vzorné vedení bakalářské práce, za jeho cenné rady, čas, trpělivost a vyřízení administrativních formalit potřebných pro uskutečnění měření. Také bych rád poděkoval Mgr. Josefu Vlčkovi a Petru Karpíškovi za pomoc při terénním měření. Dík patří i zaměstnankyním ČHMÚ, konkrétně náměstkyni ředitele úseku meteorologie a klimatologie RNDr. Pavle Skřivánkové a Daně Pýchové ze sekretariátu odboru klimatologie, za dodání průběhu teplot z prvního termínu měření.

Abstrakt:

Práce je zaměřena na problematiku bezkontaktního měření vodivosti mělkých partií geologického prostředí a skládá se ze dvou vzájemně propojených částí, rešeršní a experimentální. V první části jsou uvedeny teoretické principy bezkontaktního měření vodivosti, přehled aktuálně vyráběných elektromagnetických aparatur pro určení vodivosti (konduktometry) a možnosti využití konduktometrie při zjišťování a sledování kontaminantů. Základem experimentální části práce je terénní testovací měření konduktometrem CMD (výrobce GF Instruments, s.r.o. Brno) na vybrané lokalitě, a to pro několik hloubkových úrovní. Náplň této části zahrnuje vlastní terénní měření, zpracování dat a komplexní interpretaci výsledků, jednak v kontextu s geologickou situací lokality a petrofyzikálními poznatky, a také ve spojení se stabilitou přístroje.

Abstract:

The task is focused on the issue of contactless conductometry for shallow parts of geological medium and it consists of two connected parts, search and experimental. The first part includes fundamental theoretical principles of contactless conductivity measurement, summary of presently manufactured electromagnetic devices (ground conductivity meters) and finally it presents the potentialities of using conductometry for detection and monitoring of contaminants. The basis of the second part comprises the field test measurements with the instrument CMD (producer GF Instruments, s.r.o. Brno) on the selected locality, namely for several depth levels. The contents of this part include the field measurement, data processing and complex interpretation of the results in connection with geological conditions of the locality, petrophysical knowledge and with the stability of the device.

Obsah:

1. Úvod	7
2. Bezkontaktní měření vodivosti a konduktometry	8
2.1. Konduktometrie v komplexu elektromagnetických metod	8
2.2. Princip měření a měřené veličiny	9
2.3. Srovnání použitelných módů přístroje	12
2.4. Vodivost a odpor ve spojení s konduktometrií	15
2.5. Přehled v současnosti vyráběných konduktometrů	17
3. Využití konduktometrie v praxi	20
3.1. Aplikační oblasti	20
4. Testovací měření konduktometrem CMD	26
4.1. Cíle měření	26
4.2. Geologická charakteristika lokality Hostivař – Kozinec	27
4.3. Metodika měření a použitá aparatura	29
4.4. Zpracování naměřených dat	30
4.5. Geologická interpretace výsledků měření	32
4.6. Vyhodnocení testovacího měření	35
5. Závěr	41
6. Použitá literatura	42

1. Úvod

Hlavním cílem této práce je seznámit čtenáře s podstatou fungování bezkontaktních měřičů vodivosti, kterým se v tuzemské terminologii říká konduktometry. Práce je rozdělená na dvě části: teoretickou a praktickou.

Teoretická část má rešeršní charakter a tvoří kostru této práce. Obsahuje zařazení konduktometrie do elektromagnetických metod a základní principy této metody. Dále jsou uvedeny měřené veličiny, zdánlivá měrná vodivost a tzv. inphase složka, a typické odezvy a problémy při interpretaci naměřených dat.

Součástí tohoto oddílu je také seznam v současnosti vyráběných konduktometrů, které se využívají pro geofyzikální průzkum. Uvedeny jsou jejich technické parametry, různé typy konstrukcí a možnosti využití konduktometrie v praxi. Práce je doplněna výběrem z konkrétních případových studií, ve kterých byly konduktometry využity pro zjišťování a sledování kontaminantů.

Praktická část je experimentálního charakteru. Impulesem pro tuto část byla možnost otestovat nově zakoupené českou firmou vyvinuté konduktometry CMD-Explorer a CMD-MiniExplorer. Cílem bylo provést testovací měření a zhodnotit stabilitu nových přístrojů.

2. Bezkontaktní měření vodivosti a konduktometry

2.1. Konduktometrie v komplexu elektromagnetických metod

Elektromagnetické metody tvoří velmi početnou skupinu geofyzikálních metod, kde každá z nich umožňuje měření jedné nebo více komponent existujícího nebo uměle vyvolaného časově proměnného elektromagnetického pole. Kromě pozemních metod existují modifikace pro letecký a mořský průzkum, a tak tyto metody nacházejí uplatnění v širokém spektru oborů.

Teoretický základ těchto metod položil v roce 1873 Maxwell formulací rovnic elektromagnetismu (Mareš et al. 1990), přičemž vycházel z předešlých průkopnických prací Coulomba, Gausse, Ampèra či Faradaye. V geofyzikální praxi se jeho poznatky začaly využívat ve dvacátých letech 20. století, a to ve Spojených státech, Kanadě a Skandinávii, pro vyhledávání masivních sulfidických rud a dalších vysoce vodivých ložisek nerostných surovin (Karous 1989).

Až do šedesátých let minulého století pracovaly prakticky všechny přístroje s vlastním zdrojem ve frekvenční oblasti (FDEM¹), kde je principem vysílání a přijímání uměle vyvolaného elektromagnetického pole s určitou frekvencí, která je v čase konstantní (Telford et al. 1990). Na začátku šedesátých let vzrostl zájem pro využití elektromagnetických metod ve větších hloubkách, které by umožnilo průzkum ložisek plynu a ropy a geotermálních struktur. Aby bylo možno proniknout do takových hloubek, bylo třeba signálu s širším frekvenčním spektrem krátkého trvání. Takto se zrodily metody pracující v časové oblasti (TDEM²), které využívají krátkých proudových pulsů různých tvarů, kde hloubka průniku závisí na době trvání pulsů.

Dlouhou dobu bylo považováno za nemožné používat metody z frekvenční i časové oblasti v blízké zóně vysílače (Zhdanov 2012). Tuto domněnku vyvrátil ruský geofyzik Obukhov na konci šedesátých let 20. století, který dokázal, že velikost elektromagnetického pole, vyvolané zdrojem TDEM, je přímo úměrná odporu prostředí i v blízké zóně vysílače. Obukhov tak dokázal, že přijímač může být umístěn i v těsné blízkosti vysílače.

¹ Frequency Domain Electromagnetic Methods

² Time Domain Electromagnetic Methods

V dalších letech byly díky rozvoji elektrotechniky a možností zpracování dat vynalezeny další elektromagnetické techniky pro aplikace v inženýrské a environmentální geologii (Reynolds 2011). Mezi tyto relativně nové metody patří také konduktometrie, což je aktivní bezkontaktní metoda vyžívající přenosných aparatur; výstupem měření jsou hodnoty zdánlivé měrné vodivosti zkoumaného prostředí. Konduktometrie patří mezi metody dipólového elektromagnetického profilování (zkráceně DEMP), které jako zdroj využívají magnetické dipóly ve formě cívek. Do této skupiny metod patří například i metoda Slingram.

2.2. Princip měření a měřené veličiny

Konduktometrie je elektromagnetickou metodou, která využívá sekundárního elektromagnetického pole vznikajícího indukci v důsledku přítomnosti vodivých těles v zemi. Zdrojem uměle vytvářeného budícího pole je cívka, kterou prochází střídavý proud, a ten podle Ampèrova zákona generuje harmonické magnetické pole šířící se od zdroje i pod povrch země (Mazáč et al. 1997). Takto vzniklé magnetické pole se označuje jako primární pole, je synfázní s proudem v cívce, kterou nazýváme vysílací cívkou, a má formu:

$$B^P(t) = B_0 \sin(\omega t), \quad (2.2.1)$$

kde B_0 je jeho amplituda, ω je úhlová frekvence, která je dána vztahem $\omega = 2\pi f$, kde f značí frekvenci.

Šířící se primární pole vytváří v zemi v souladu s Faradayovým zákonem velmi slabé vířivé proudy, jejichž velikost je úměrná vodivostním vlastnostem prostředí, a tyto proudy indukují sekundární magnetické pole:

$$B^S(t) = B_1 \sin(\omega t + \gamma), \quad (2.2.2)$$

kde B_1 je amplituda sekundárního pole a γ je fázový posun. Sekundární pole je fázově zpožděné za primárním polem a tento fázový posun je dán elektrickou vodivostí horninového prostředí. Je-li toto prostředí zcela vodivé, pak je sekundární pole fázově posunuto o $\pi/2$ a říkáme, že je zcela mimo fázi.

Sekundární magnetické pole je spolu s primárním zachyceno přijímací cívkou, která se nachází ve vzdálenosti s od vysílací cívky. Toto pole je mnohokrát slabší, než primární pole a dlouhou dobu bylo technicky obtížné od sebe obě oddělit.

Pokud součet primárního a sekundárního pole pojmenujeme jako totální pole, můžeme ho vyjádřit vztahem:

$$B^T(t) = B^P(t) + B^S(t) \quad (2.2.3)$$

$$B^T(t) = B_0 \sin(\omega t) + B_1 \sin(\omega t + \gamma) \quad (2.2.4)$$

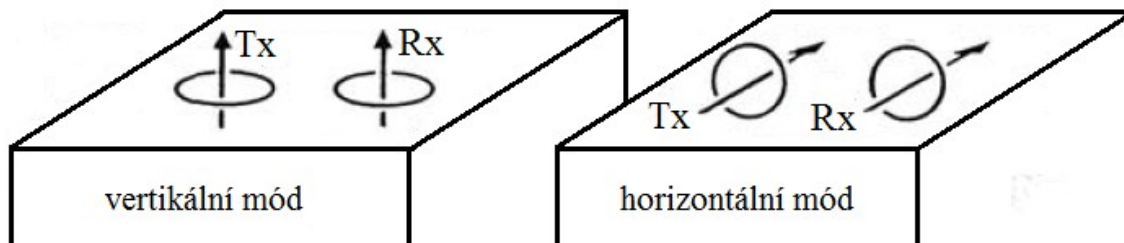
Aplikací známé rovnosti $\sin(\omega t + \gamma) = \sin \omega t \cos \gamma + \cos \omega t \sin \gamma$ na rovnici (2.2.4) můžeme totální pole rozepsat a poté upravit:

$$B^T(t) = B_0 \sin(\omega t) + B_1 \sin \omega t \cos \gamma + B_1 \cos \omega t \sin \gamma \quad (2.2.5)$$

$$B^T(t) = (B_0 + B_1 \cos \gamma) \sin \omega t + (B_1 \sin \gamma) \cos \omega t, \quad (2.2.6)$$

kde $(B_0 + B_1 \cos \gamma)$ se nazývá reálná část (Re) a udává amplitudu složky, která je synfázní s primárním polem a po odečtení amplitudy známého primárního pole ji lze zjednodušit a zapsat jako $(B_1 \cos \gamma)$. Člen $(B_1 \sin \gamma)$ představuje část imaginární (Im) a charakterizuje mimofázní složku harmonického pole. Právě tato mimofázní složka je z hlediska informací o vodivosti šetřeného prostředí nejdůležitější.

Vysílací (Tx) a přijímací (Rx) cívka jsou koplanární, vždy leží ve stejné rovině vzhledem k sobě. V závislosti na jejich orientaci k povrchu rozlišujeme vertikální a horizontální mód (obr. č. 1). Ve vertikálním módu je osa cívek kolmá k povrchu, zatímco v horizontálním je osa cívek rovnoběžná s povrchem.



Obr. č. 1: Orientace cívek vertikálního a horizontálního módu.
Zdroj: Upraveno podle McNeill 1980.

Pro poměr vertikálních složek intenzity primárního pole a sekundárního pole vertikálního (potažmo horizontálního) magnetického dipólu, ležícího na povrchu homogenního poloprostoru, platí následující vztahy (McNeill 1980):

$$\left(\frac{H_z^S}{H_z^P}\right)_V = \frac{2}{k^2 s^2} \left\{ 9 - \left[9 + 9iks + 4k^2 s^2 + ik^3 s^3 \right] e^{-iks} \right\} \quad (2.2.7)$$

$$\left(\frac{H_z^S}{H_z^P}\right)_H = 2 \left\{ 1 - \frac{3}{k^2 s^2} + \left[3 + 3iks + k^2 s^2 \frac{e^{-iks}}{k^2 s^2} \right] \right\}, \quad (2.2.8)$$

kde s značí vzdálenost mezi cívkami a k vlnové číslo. Jelikož uvažujeme o vodivém prostředí a hodnoty používaných frekvencí jsou nízké, platí zde kvazistacionární případ, pro který má vlnové číslo tvar $k = \sqrt{i\omega\mu_0\gamma}$. Symbol μ_0 představuje permeabilitu vakua, i je komplexní jednotkou a γ měrná vodivost.

Dále použijeme parametr indukční číslo, které je dáno podílem dvou parametrů: vzdáleností mezi cívkami s a skin hloubkou δ , což je hloubka, při které se šířící magnetické pole utlumí na hodnotu rovnající se $1/e$ ($\approx 37\%$) své amplitudy na povrchu země a lze ji vyjádřit v závislosti na měrné vodivosti a frekvenci:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu_0\gamma}} \quad (2.2.9)$$

$$B = \frac{s}{\delta} = s \sqrt{\frac{\omega\mu_0\gamma}{2}} \quad (2.2.10)$$

Pokud je splněna podmínka $B \ll 1$, pak můžeme rovnice (2.2.7) a (2.2.8) upravit a získat jednoduchou závislost poměru sekundárního pole k primárnímu na indukčním čísle (Kearey et al. 2002):

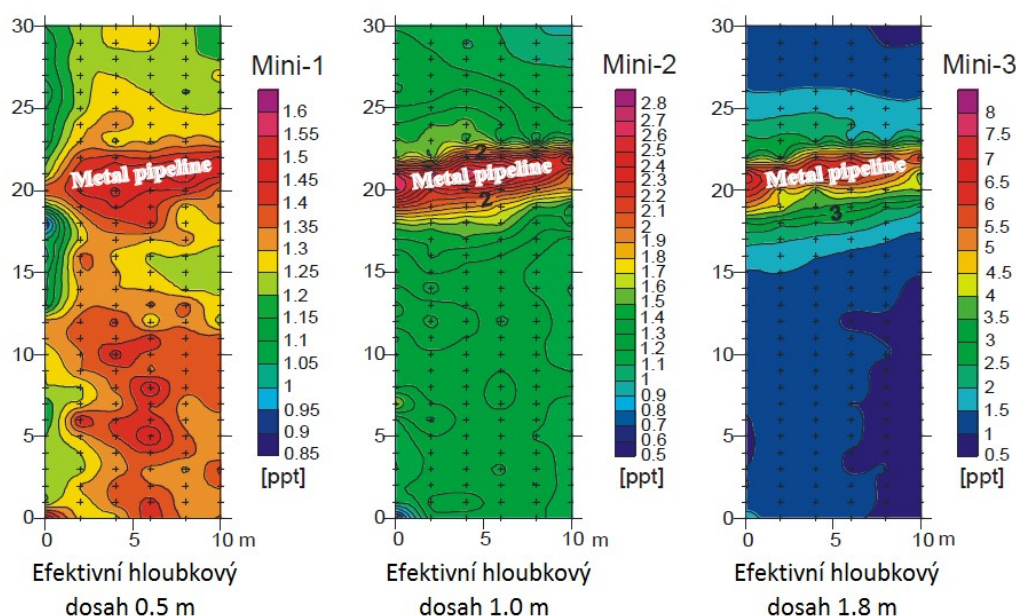
$$\left(\frac{H_z^S}{H_z^P}\right)_V \approx \left(\frac{H_z^S}{H_z^P}\right)_H = i \frac{s^2 \omega \mu_0 \gamma}{4} = i \frac{B^2}{2} \quad (2.2.11)$$

Přeskupením dostáváme vztah pro zdánlivou měrnou vodivost, která je přímo úměrná poměru sekundárního k primárnímu magnetickému poli (2.2.12).

$$\gamma_z = \frac{4}{\omega\mu_0 s^2} \operatorname{Im} \frac{H_z^S}{H_z^P} \quad (2.2.12)$$

Na tomto principu fungují moderní elektromagnetické přístroje, které umožňují měření zdánlivé měrné vodivosti ve stanovené hloubce. Těmto přístrojům říkáme konduktometry a parametry (vzdálenost s , frekvence f) těchto přístrojů jsou nastaveny tak, aby změny naměřených hodnot byly závislé jen na změnách vodivosti horninového prostředí.

Kromě vodivosti jsou tyto přístroje schopny měřit i synfázní složku sekundárního elektromagnetického pole, která koresponduje s magnetickou susceptibilitou prostředí. Tato složka se označuje výrazem inphase³ a její hodnota je většinou uváděna jako relativní hodnota v ppt (parts per thousand) a často se využívá pro lokalizaci kovových objektů pod zemí jako například inženýrské sítě apod. Příklad odezvy inphase složky na kovovou trubku, uloženou v malé hloubce pod povrchem, je k vidění na obr. č. 2.



Obr. č. 2: Mapa izolinií inphase složky pro tři hloubkové dosahy přístroje CMD-MiniExplorer. Poloha trubky je znázorněna bílým nápisem.

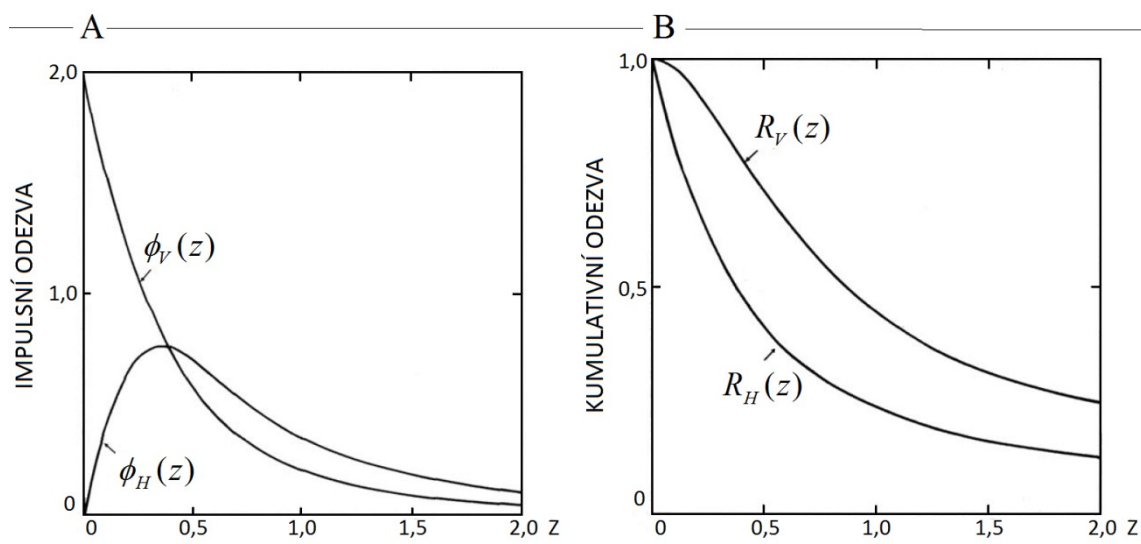
Zdroj: GF Instruments, s.r.o. (2013). Short Guide for electromagnetic conductivity mapping.

2.3. Srovnání použitelných módů přístroje

Konduktometry se dají používat jak ve vertikálním tak i v horizontálním módu, jelikož změny módu se dá dosáhnout prostým otočením přístroje o 90°, čímž se změní orientace osy cívek. Každý z těchto módů poskytuje poněkud rozdílný způsob

³ z anglického „in phase“ - synfázní

odezvy (Sharma 1997). Na obr. č. 3A můžeme pozorovat srovnání horizontálního a vertikálního módu a jejich impulsní odezvy pro tenkou nekonečnou horizontální desku, která se nachází v homogenním poloprostoru v hloubce z , což je skutečná hloubka desky normalizovaná vzdáleností mezi vysílací a přijímací cívkou. Funkce $\phi(z)$ popisuje relativní příspěvek této tenké desky sekundárnímu magnetickému poli.



Obr. č. 3: (A) Funkce impulsní odezvy pro horizontální ($\phi_H(z)$) a vertikální mód ($\phi_V(z)$). (B) Funkce kumulativní odezvy pro horizontální ($R_H(z)$) a vertikální ($R_V(z)$) mód.

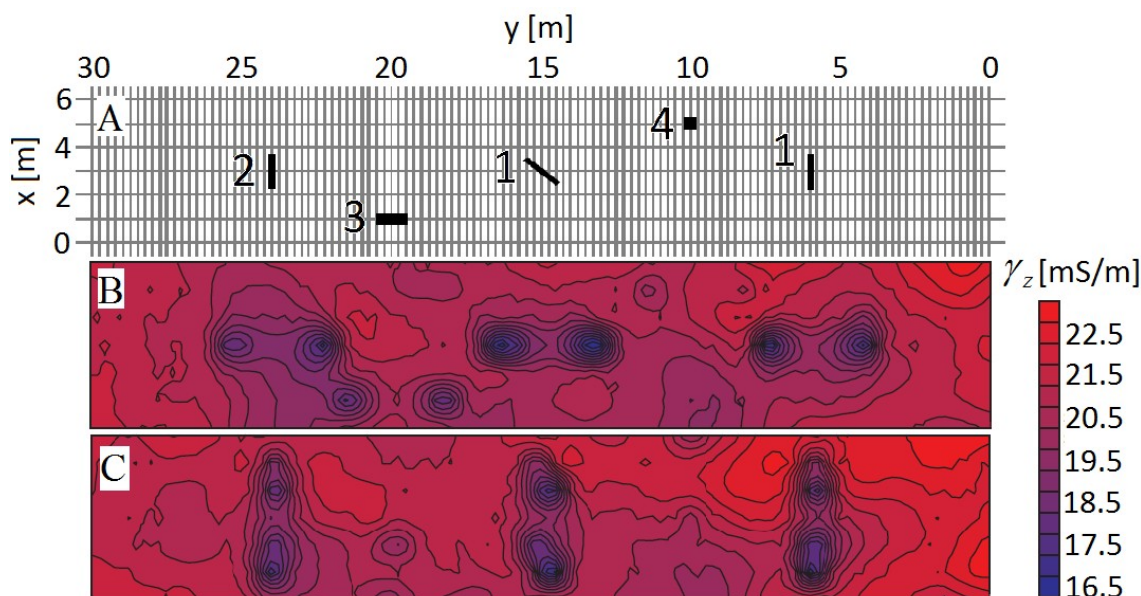
Zdroj: Upraveno podle McNeill 1980.

Z obrázku je patrné, že oba módy se liší citlivostí na vodivý materiál v závislosti na hloubce, v které se nachází. V horizontálním módu je relativní příspěvek materiálu největší u povrchu a s narůstající hloubkou klesá. Oproti tomu ve vertikálním módu je nejvýraznější relativní příspěvek v normalizované hloubce přibližně $z = 0,4$ a přístroj je v tomto módu, na rozdíl od horizontálního, málo citlivý na vodivostní anomálie nacházející se v blízkosti povrchu.

Obr. č. 3B ukazuje rozdílné křivky funkce kumulativní odezvy $R(z)$ pro oba módy. Funkce $R(z)$ vyjadřuje celkový příspěvek sekundárnímu magnetickému poli od všeho materiálu, který se nachází pod danou hloubkou. Je vidět, že při hloubce, odpovídající dvojnásobku vzdálenosti mezi cívkami s (normalizovaná hloubka $z = 2$), představuje příspěvek všeho materiálu pod touto hloubkou pro vertikální mód ($R_V(z)$) asi 25% celkového příspěvku sekundárnímu poli a pro horizontální mód ($R_H(z)$) zhruba 12%

tohoto příspěvku. Z toho vyplývá, že efektivní hloubka dosahu je pro horizontální mód přibližně dvakrát menší než pro vertikální mód. Kombinací těchto dvou módů tak můžeme získat pro jeden měřený bod hodnoty zdánlivé měrné vodivosti ze dvou hloubek.

Měření konduktometrem podél profilu lze provádět dalšími dvěma způsoby a to buď paralelně, kdy je konduktometr v jedné linii s profilem, nebo kolmo, kdy se pohybujeme s přístrojem kolmo na profil. Módy se liší pozicí objektu vzhledem k cívkám přístroje, což může být příčinou rozdílů v anomálii, kterou tento objekt vyvolává. Toto potvrzuje i práce, ve které autoři, Benavides a Everett (2005), ukazují rozdíly v odezvě podélného (obr. č. 4B) a kolmého módu (obr. č. 4C) na sérii pohřbených olověných trubek v relativně homogenním prostředí. Prostorové rozmístění a orientace trubek jsou zobrazeny na obr. č. 4A. Oblast byla pokryta sedmi profily vzdálenými od sebe 1 m a proměřena s krokem 0,25 m pomocí přístroje *EM31* firmy Geonics, u kterého je vzdálenost mezi vysílací a přijímací cívkou 3,66 metrů. Můžeme si povšimnout toho, že trubky vyvolávají anomálie se dvěma maximy, jejichž spojnice je ve směru spojnice cívek, a jejichž pozice je tak pro oba módy odlišná. Vzdálenost mezi maximy dvou anomálií, pocházejících od jedné trubky, odpovídá vzdálenosti cívek měřicí aparatury.



Obr. č. 4: Odezva EM31 na vodivá tělesa. (A) Uspořádání kovových trubek v průzkumné síti. (B) Mapa izolinií zdánlivé m. vodivosti pro podélný mód. (C) Mapa izolinií zdánlivé m. vodivosti pro kolmý mód.

Zdroj: Upraveno podle Benavides & Everett 2005

2.4. Vodivost a odpor ve spojení s konduktometrií

Výstupním parametrem, který konduktometry poskytují, jsou hodnoty zdánlivé měrné vodivosti. Zdánlivá měrná vodivost je definována jako měrná vodivost homogenního izotropního prostředí, kterou bychom za stejných podmínek naměřili stejnou aparaturou. Ideální podmínky tohoto typu však v reálném geologickém prostředí nenajdeme, protože skutečné geologické struktury se skládají z různých složek s rozdílnými vodivostními vlastnostmi.

Obecně je měrná vodivost fyzikální veličinou, která určuje schopnost materiálu vést elektrický proud a je definována jako převrácená hodnota měrného odporu. Jednotkou měrné vodivosti je Sm^{-1} (siemens/metr).

$$\gamma = \frac{1}{\rho} \quad (2.4.1)$$

Rozlišujeme dvě formy vodivosti: elektronovou a iontovou. Elektronová vodivost je typická pro kovy a polovodiče, ve kterých je náboj přenášen volnými elektrony, zatímco iontová vodivost je charakterizována přenosem náboje ionty a vyskytuje se především v kapalinách vyplňujících póry.

Látky můžeme podle vodivosti rozdělit na vodiče, polovodiče a dielektrika (izolanty). Většina horninotvorných minerálů patří do poslední jmenované skupiny a velkou roli pro vedení proudu horninou tak hraje iontová vodivost.

Jedním z důležitých faktorů ovlivňujících vodivost, potažmo odpor, horniny je její pórovitost, která je dána objemem pórů vztaženému k celkovému objemu horniny. V pórech se může a nemusí vyskytovat kapalina, což je vyjádřeno stupněm nasycení horniny s . Vztah odporu horniny a těchto faktorů popisuje Archieho zákon (Lowrie 2007):

$$F = \frac{\rho}{\rho_w} = a \cdot P^{-m} \cdot s^{-n}, \quad (2.4.2)$$

kde F je formační faktor, ρ je měrný odpor horniny, ρ_w je měrný odpor kapaliny v pórech, P je pórovitost, a je strukturní koeficient, m a n jsou cementační exponenty. V případě plně nasycené horniny ($s = 1$) vymizí z rovnice (2.4.2) poslední člen. Je také zřejmé, že propojení vodivé složky, ať už se jedná o vodivé minerály nebo elektrolyt, zvyšuje vodivost horninového prostředí.

Na odpor a vodivost horniny mají vliv také proměnné faktory jako teplota a tlak. Zvýšením tlaku dochází ke změnám v pórovitosti horniny a zároveň může docházet k vytlačování kapalin z pórů, což vede k variacím v odporu horniny. Závislost vodivosti a odporu na teplotě a tlaku se projevuje především u metod s velkým hloubkovým dosahem neboť v malých hloubkách se odporové vlastnosti prostředí s tlakem a teplotou výrazně nemění (Kobr 1997).

Složení hornin a široká škála činitelů ovlivňujících jejich odpor mají za následek velký rozptyl hodnot odporů typických pro danou horninu, který se v mnoha případech pohybuje v rozmezí několika řádů. Často se také setkáváme s případy, kdy naměřené hodnoty spadají do rozptylu hodnot typických pro více druhů hornin a tento přesah tak může znepříjemnit interpretaci naměřených dat.

Některé moderní konduktometry jsou složeny až ze tří párů vysílacích a přijímacích cívek s rozdílnou vzdáleností a umožňují tak měření hodnot zdánlivé vodivosti ve třech hloubkách současně. Kombinací vertikálního a horizontálního módu můžeme počet těchto hodnot pro jeden měřicí bod zdvojnásobit, čímž dostáváme už poměrně slušný počet hodnot pro pozorování změn vodivostních podmínek zkoumaného prostředí s hloubkou. Problémem při interpretaci je však fakt, že hodnoty vodivosti měřené elektromagnetickými metodami nedostáváme přímým fyzikálním měřením tohoto parametru, ale vyvozením z empirické závislosti na měřených parametrech elektromagnetického pole. Změřená hodnota se vztahuje k referenčnímu bodu, jehož pozice je většinou dána středem mezi vysílací a přijímací cívkou a hloubka je určena vzdáleností mezi cívkami a použitou frekvencí.

Z hodnot zdánlivé vodivosti (či odporu) můžeme sestavit pseudořez (někdy také označovaný jako izoohmický řez), který zhruba popisuje rozložení odporových vlastností v řezu pod profilem. Proces umožňující získání řezu, který lépe odpovídá skutečnosti, se nazývá inverze (2D). Ta se provádí pomocí počítačových programů, ve kterých si buď uživatel nadefinuje svůj teoretický model, nebo použije model navrhovaný programem. Řadou iteračních procesů dochází k minimalizování rozdílu mezi naměřenými daty a parametry modelu, čímž se od naměřených dat dostáváme k finálnímu modelu (Burger et al. 2006). Některé konduktometry provádí 1D inverzi in situ, nebo poskytují výstupy kompatibilní s používanými inverzními programy, jako jsou RES2DINV nebo IX1D.

2.5. Přehled v současnosti vyráběných konduktometrů

Konduktometry se v geofyzikální praxi využívají už od 80. let minulého století a tak existuje větší počet firem, které ve své nabídce obsahují i tyto elektromagnetické měřiče. V této práci je uveden výběr komerčně nejznámějších produktů od různých výrobců. Většina z nich sídlí v Severní Americe, kde probíhal nejintenzivnější vývoj těchto aparatur, nicméně výrobce lze nalézt i na našem kontinentu. Výstupním parametrem je u všech přístrojů (kromě systému *OhmMapper*) zdánlivá měrná vodivost v jednotkách mS/m a inphase složka v ppt (u systému *GEM-2* v jednotkách ppm⁴).

Konduktometry můžeme rozdělit do dvou kategorií podle typu konstrukce. Do první kategorie patří přístroje, které jsou tvořeny dvojicí cívek větších rozměrů spojených kabelem (takzvané „duální“ konduktometry) a druhou, rozšířenější kategorií, tvoří přístroje, u kterých jsou cívky umístěny v kompaktním tubusu.

Výrobky různých firem se liší v počtu vysílacích a přijímacích cívek a ve vzdálenostech mezi těmito cívkami. Tyto vzdálenosti a maximální hloubkové dosahy jsou shrnuty v tab. č. 1 a 2.

PŘÍSTROJ	POČET HL. ÚROVNÍ	VZDÁLENOSTI CÍVEK [m]	MAXIMÁLNÍ HL. DOSAH [m]
Výrobce: Geonics Limited (sídlo: Mississauga, Kanada) Zdroj: oficiální webové stránky společnosti (http://www.geonics.com)			
<i>EM34-3</i>	3 (6)	10	15
		20	30
		40	60
Výrobce: GF Instruments, s.r.o. (sídlo: Brno, Česká Republika) Zdroj: oficiální webové stránky společnosti (http://www.gfinstruments.cz)			
<i>CMD-DUO</i>	3 (6)	10	15
		20	30
		40	60

Tab. č. 1: Přehled „duálních“ konduktometrů. Počet hl. úrovní je uveden pro jeden mód, v závorce je počet hl. úrovní dohromady.

⁴ parts per million

PŘÍSTROJ	POČET HL. ÚROVNÍ	VZDÁLENOSTI CÍVEK [m]	MAXIMÁLNÍ HL. DOSAH [m]
Výrobce: Geonics Limited (sídlo: Mississauga, Kanada) Zdroj: oficiální webové stránky společnosti (http://www.geonics.com)			
<i>EM31-MK2</i>	1 (2)	3.66	6.0
<i>EM31-SH</i>	1 (2)	2.0	4.0
<i>EM38-MK2</i>	2 (4)	0.5, 1.0	1.5
Výrobce: Dualem Inc. (sídlo: Milton, Kanada) Zdroj: oficiální webové stránky společnosti (http://www.dualem.com)			
<i>DUALEM-21S</i>	2 (4)	1.0, 2.0	3.0
<i>DUALEM-42S</i>	2 (4)	2.0, 4.0	6.0
<i>DUALEM-421S</i>	3 (6)	1.0, 2.0, 4.0	6.0
<i>DUALEM-642S</i>	3 (6)	2.0, 4.0, 6.0	9.0
Výrobce: GISCO (sídlo: Minneapolis, USA) Zdroj: oficiální webové stránky společnosti (http://www.giscogeo.com)			
<i>CMD-1</i>	1 (2)	0.98	1.5
<i>CMD-2</i>	1 (2)	1.89	3.0
<i>CMD-4</i>	1 (2)	3.77	6.0
Výrobce: GF Instruments, s.r.o. (sídlo: Brno, Česká Republika) Zdroj: oficiální webové stránky společnosti (http://www.gfinstruments.cz)			
<i>CMD-Explorer</i> (obr. č. 5A)	3 (6)	1.48, 2.82, 4.49	6.7
<i>CMD-MiniExplorer</i> (obr. č. 5B)	3 (6)	0.32, 0.71, 1.18	1.8
<i>CMD-Tiny</i>	1 (2)	0.45	0.7
<i>CMD-1</i>	1 (2)	0.98	0.98
<i>CMD-2</i>	1 (2)	1.89	1.89
<i>CMD-4</i>	1 (2)	3.77	3.77
<i>CMD-4/6</i>	1 (2) nebo 2 (4)	3.77 nebo 5.79	5.79

Tab. č. 2: Přehled klasických konduktometrů.

Z tohoto seznamu mírně vybočuje výrobek firmy **Geophex, Ltd.** (Raleigh, USA) *GEM-2*. Tato aparatura je konstrukčně stejná jako ostatní klasické konduktometry, ale získávání hodnot vodivosti z různých hloubek funguje na odlišném principu (Zdroj: oficiální webové stránky společnosti, <http://www.geophex.com>).

GEM-2 je tvořen jedním vysílačem a jedním přijímačem vzdálenými od sebe téměř dva metry. Výrobce uvádí, že použitím vícefrekvenčního signálu lze při stejné konfiguraci získat údaje o vodivosti a inphase složky z několika hloubkových úrovní.

Přístroj používá frekvenci v rozmezí od 300 Hz do 96 kHz a maximální hloubka dosahu je 20 metrů.

Alternativou ke konduktometrům je elektromagnetický systém firmy **Geometrics** (Silicon Valley, USA) *OhmMapper* (Zdroj: oficiální webové stránky společnosti, <http://www.geometrics.com>). Jedná se také o nedestruktivní bezkontaktní metodu pro určování odporových vlastností mělkých částí země, nicméně s odlišnou konfigurací. Vysílací i přijímací cívka sestává ze dvou dipólů, jež jsou kapacitně spojeny se zemí a dohromady tvoří kabelový systém, který uživatel táhne po profilu za sebou. Délku kabelu a tedy i vzdálenost dipólů lze měnit, čímž se také zvyšuje či zmenšuje efektivní hloubkový dosah (až 12 metrů). Signál procházející vysílací cívkou má frekvenci 17kHz a indukuje do země tok proudu. Přijímací cívka následně měří napětí a aplikací příslušného geometrického faktoru, který se liší pro různé délky kabelu, jej převádí na zdánlivý měrný odpor. Zapojením aditivních přijímačů můžeme zvýšit počet hloubek průzkumu.

Operační frekvence konduktometrů druhé zmiňované kategorie se pohybuje v rozmezí prvních desítek kHz (např. *CMD-MiniExplorer* pracuje na frekvenci 30 kHz, delší sondy na nižší frekvenci) a u „duálního“ typu v rozmezí desetin až jednotek kHz (např. u *EM34* se frekvence pohybují v rozmezí od 0,4 do 6,4 Hz podle vzdálenosti mezi cívkami).

Většina novějších konduktometrů umožňuje měřit i v kontinuálním módu v kombinaci s GPS.



Obr. č. 5: Aparatury *CMD-Explorer* (A) a *CMD-MiniExplorer* (B)
Zdroj: webové stránky Skagaffjordur Archaeological Settlement Survey
(<http://blogs.umb.edu/sass/>)

3. Využití konduktometrie v praxi

3.1. Aplikační oblasti

Jednou z hlavních výhod konduktometrů je, že při měření nepotřebují kontakt se zemí. Díky snadné přenosnosti poskytují možnost rychlého sběru dat, a tudíž umožňují poměrně rychle a levně pokrýt velkou zájmovou plochu. Oblast průzkumu je většinou zkoumána sérií profilů a rozestup bodů na profilu je dán časem a financemi určenými pro průzkum a požadovaným rozlišením grafických výstupů, které jsou často kvalitní díky dostatečné hustotě bodů. Tyto pozitivní faktory jsou důvodem, proč je tato metoda používána v širokém spektru oborů a pro různorodé úkoly.

V zemědělství se využívá faktů, že hodnoty zdánlivé měrné vodivosti jsou ovlivňovány vlastnostmi zkoumané půdy, jako jsou obsah vody a koncentrace iontů v roztoku v pórech nebo podíl jílovité složky (Doolittle & Brevik 2014). Pro tuto aplikační oblast je typické určování hloubky a mapování kvality zemědělských půd, sledování zavlažovacích systémů a zemědělského odpadu, sledování efektu hnojení, mapování koncentrací rozpustných solí v půdě atd.

V archeologii slouží konduktometrie pro detekci pozůstatků zdí, opevnění či sklepních a dalších prostor. Tato metoda se hodí pro detailní průzkum historicky osídlených oblastí. Příkladem je geofyzikální průzkum realizovaný v Turíně v Itálii, jehož cílem bylo nalezení pozůstatků kasáren zbořených během 2. sv. války. V době průzkumu lokalita sloužila jako parkoviště (Godio et al. 2000). Výsledky měření posloužily pro určení míst budoucích výkopů a posouzení bezpečnosti lokality z hlediska přítomnosti podzemních prostorů.

Měření konduktometry se využívá také při geologickém mapování v mělkých hloubkách pro různé účely, například pro lokalizaci zlomů a dalších tektonických poruch, zjišťování rozsahu štěrkového násypu, rozlišení jílu či jílovitých sedimentů od písků apod. Konduktometrie se ukázala jako vhodná metoda i pro nalezení preferenčních drah infiltrace povrchové vody, které vznikly při povrchu v důsledku podzemní těžby (Carpenter & Ahmed 2002).

Dalším oborem, kde se konduktometrie často uplatňuje, je inženýrská geologie. Tato metoda je užitečná při mapování svahových deformací a poruchových zón nebo

například pro určení hranic zvodněných zón. Inphase složka se využívá pro detekci podzemních sítí a dalších kovových předmětů.

3.2 Možnosti konduktometrie při zjišťování a sledování kontaminantů

Bezkontaktní měření vodivosti je vhodnou metodou pro řešení environmentálních problémů, jako je lokalizace zdrojů znečištění a sledování šíření znečištěných látek v malých hloubkách pod povrchem terénu. Kontaminant může svými fyzikálními a chemickými vlastnostmi kontrastovat s prostředím, ve kterém se vyskytuje, a tento kontrast může být zaznamenán povrchovým geofyzikálním měřením.

Zdrojem kontaminace bývají úniky látek z průmyslových zařízení, jako jsou výroby chemikálií, metalurgické továrny, keramické továrny apod. Znečištění může také pocházet ze zemědělských zařízení (např. únik z nádrže tekutého hnojiva). Kontaminace podzemní vody může být zapříčiněna i únikem chemikálií při důlních činnostech, kdy tyto látky způsobují změnu ve vodivosti pórové tekutiny. Typickým příkladem jsou kyselé důlní vody (AMD⁵).

Běžným úkolem bývá vymezení hranic starých skládek odpadu a nalezení preferenčních cest pohybu kontaminantu. Skládky často obsahují i kovové přepravky či barely s nebezpečným odpadem, jejichž pozici může konduktometrie snadno odhalit.

V této práci bude uveden výběr z dostupných případových studií, ve kterých byla použita konduktometrie ve spojení se zjišťováním a sledováním kontaminantů a jejich zdrojů.

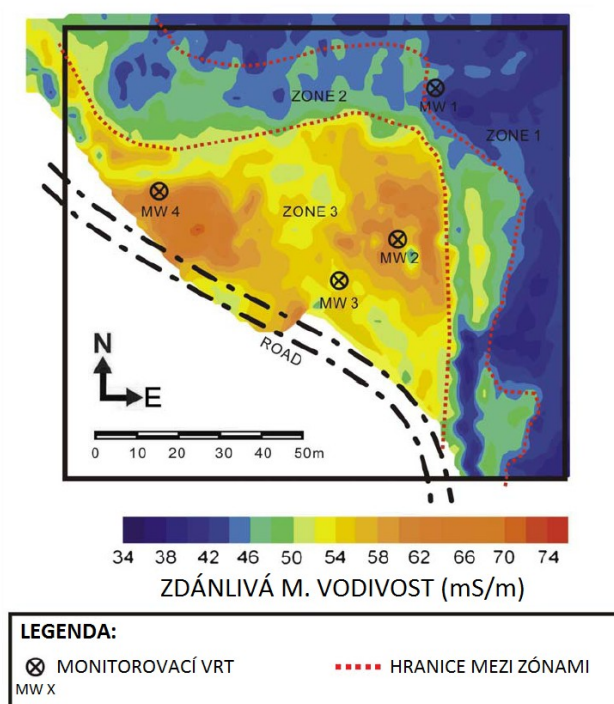
MAPOVÁNÍ KONTAMINAČNÍHO MRAKU V OPUŠTĚNÉ PRŮMYSLOVÉ ZÓNĚ (Shaohong 2010)

Jádrem této práce je geofyzikální průzkum realizovaný přístrojem *EM31-MK2* (Geonics) na území opuštěné průmyslové zóny; úkolem průzkumu bylo vymezit rozsah kontaminačního mraku a doplnit tak informace z dřívějších monitorovacích vrtů. Z geologického hlediska je oblast průzkumu tvořena především aluviálními sedimenty, které spolu s dalšími formacemi (holocénní a pleistocénní) tvoří sérii propustných kolektorů. Statická hladina podzemní vody se nachází v hloubce kolem 2m.

⁵ AMD – acid mine drainage

Výsledky jsou prezentovány ve formě interpolované mapy hodnot zdánlivé vodivosti (obr. č. 6), podle kterých můžeme zájmovou oblast rozdělit na tři zóny: nedotknutá zóna 1 (ZONE 1) s nízkými hodnotami vodivosti, tvořená kompaktnějšími sedimenty, přechodová zóna 2 (ZONE 2) a kontaminovaná zóna 3 (ZONE 3) s vysokými hodnotami vodivosti indikujícími přítomnost kontaminantu.

Z výsledných dat je patrné rozšiřování kontaminačního mraku severovýchodním směrem od silnice. Absence dat jihozápadně od silnice bohužel znemožňuje přesnější určení polohy a typu zdroje znečištění.



Obr. č. 6: Mapa izolinií zdánlivé měrné vodivosti.
Upraveno podle Shaohong 2010.

POVRCHOVÉ VYMEZENÍ SKLÁDKY (Soupios et al. 2007)

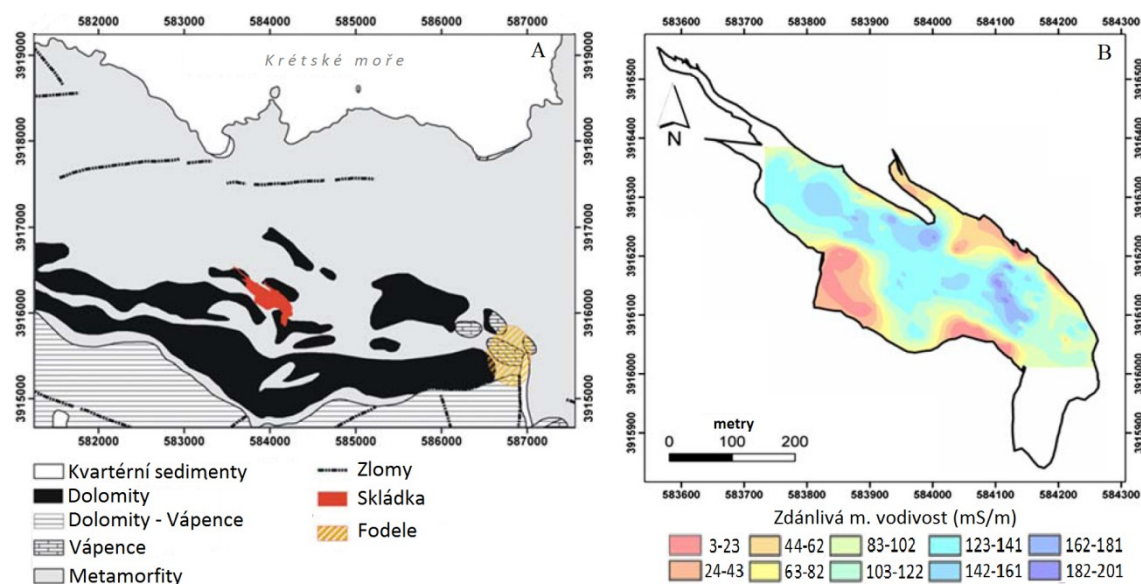
Cílem komplexního geofyzikálního průzkumu bylo stanovení prostorových parametrů skládky a určení potenciálních aktivních zón šíření kontaminace. K tomuto účelu byla zvolena kombinace geofyzikálních metod (metody ERT⁶, VDV⁷, konduktometrie a seismické metody). Skládka se nachází nedaleko

⁶ ERT – electrical resistivity tomography (multielektroková metoda)

⁷ VDV – metoda velmi dlouhých vln

městečka Fodele na severu centrální části Kréty, geologickou situaci této oblasti dokládá obr. č. 7A. Formace metamorfovaných hornin jsou tvořeny především vrstevnatými karbonáty, fylity a břidlicemi různého stáří. Podloží skládky je tvořeno vápenci a dolomity. Měření konduktometrem *EM31-MK2* (Geonics) bylo uskutečněno s krokem 5 m, a to v sérii profilů, které skládku protínají v různých směrech. Z výsledných dat byly vyfiltrovány extrémní hodnoty, které by mohly zastínit zájmové anomálie; výsledky vycházející z očištěných dat jsou zobrazeny na obr. č. 7B.

Na první pohled můžeme rozdělit území skládky na oblasti s vysokou vodivostí a na oblasti s nízkou vodivostí, jejichž pozice určuje hranici mezi uloženým odpadem a okolními horninami. Hodnoty vodivosti dobře korelují s mocností skládky určené pomocí multielektrodové metody, právě tato metoda byla největším přínosem pro rozlišení typu a hloubky uloženého odpadu.



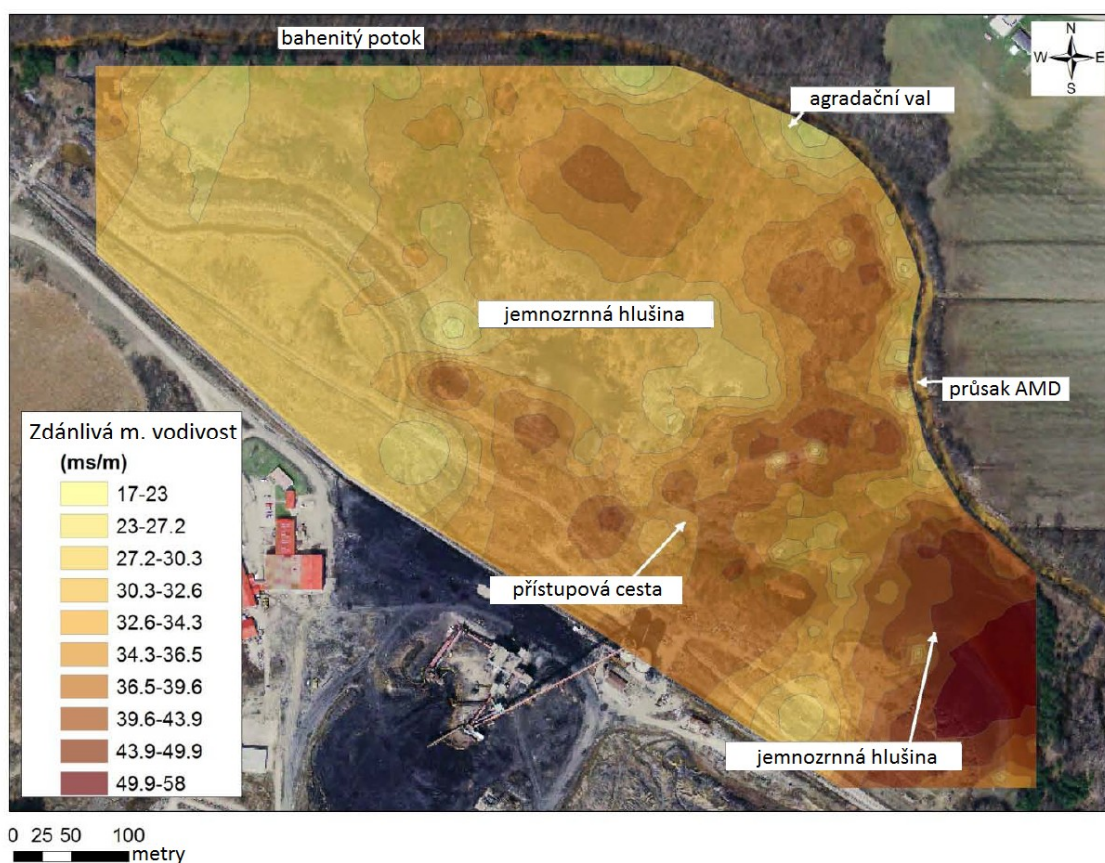
Obr. č. 7: (A) Zjednodušená geologická mapa zájmové oblasti. (B) Mapa zdánlivé měrné vodivosti na území skládky.
Upraveno podle Soupois et al. 2007.

MAPOVÁNÍ KONTAMINACE KYSELÝMI DŮLNÍMI VODAMI (Gore & Oliphant 2010)

Tato studie se zabývá možností využití konduktometrie pro vymezení prostorových změn v kvalitě podzemní vody na území bývalého uhelného dolu v jihovýchodní části Indiany (USA). V oblasti se nachází především jemnozrnná hlušina, hrubozrnný materiál byl rekultivován a je nyní pokryt vegetací. Konduktometrie byla zvolena kvůli

malé hloubce hladiny podzemní vody. Pro měření byla použita aparatura EM34 (Geonics) se vzdáleností cívek 10m a hloubkovým dosahem asi 15 m. Místa měření byla zaměřena pomocí GPS a pro kontinuální zobrazení výsledků byly hodnoty interpolovány pomocí softwaru ArcGis (obr č. 8).

V jihovýchodní části zkoumaného území se nachází oblast s nejhorší kvalitou podzemní vody, tato oblast se vyznačuje nejvyššími hodnotami zdánlivé měrné vodivosti. Kontaminace se z této zóny šíří směrem k průsaku kyselých důlních vod (AMD), který leží na hranici zkoumaného území. Další podobná vodivá zóna se rozprostírá kolem přístupové cesty a postupuje taktéž směrem na sever k průsaku. Tento předpokládaný pohyb kontaminantu potvrdil i model proudění podzemní vody a zvýšené hodnoty vodivosti také dobře korelují se zvýšenými hodnotami specifické vodivosti (která je dána celkovým obsahem rozpuštěných látek) zjištěnými z vrtů.

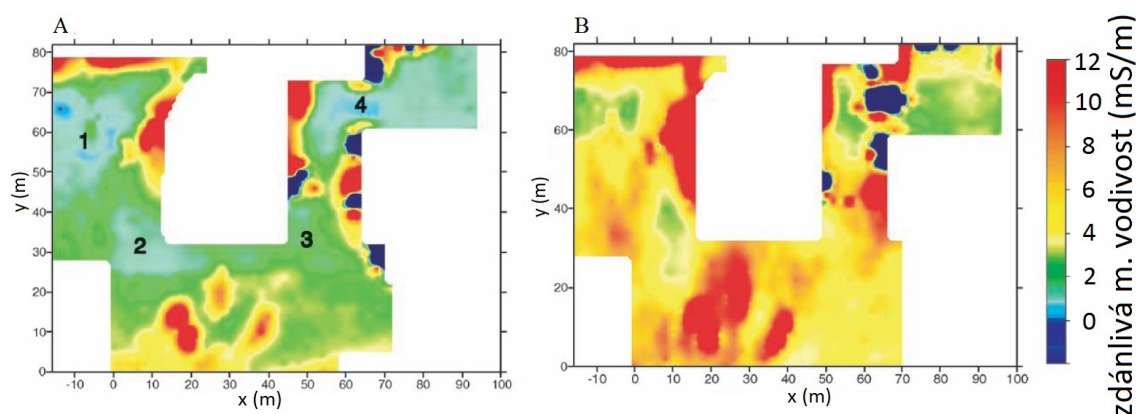


Obr. č. 8: Mapa zdánlivé měrné vodivosti.
Upraveno podle Gore & Oliphant 2010.

DETEKCE UHLOVODÍKŮ V ANTARKTICKÉM KLIMATU (Pettersson & Nobes 2003)

To, že konduktometry je možné použít v opravdu rozličných podmínkách, dokazuje studie autorů Petterssona a Nobese situovaná do oblasti výzkumného zařízení v Antarktidě. Úkolem uskutečněného geofyzikálního měření bylo určení rozsahu znečištění uhlovodíky pomocí konduktometru *EM31*⁸ (Geonics). Podloží na lokalitě je tvořeno výlevnými horninami a v některých místech je překryto materiálem přemístěným během posledního ústupu Rossova šelfového ledovce. Mocnost pokryvu se pohybuje od 0 do 2 m a obsah vlhkosti závisí na ročním období.

Měření byla uskutečněna před a během období letního tání a jejich výsledky jsou zobrazeny na obr. č. 9. Hodnoty získané během letního tání (9A) jsou generelně zhruba dvakrát vyšší, což je vysvětleno zvýšenou vlhkostí prostředí způsobenou táním zmrzlých částí půdy. Celkem byly určeny čtyři anomální oblasti se sníženými hodnotami vodivosti, které se projeví v obou časově odlehlých měřeních. Tyto snížené hodnoty vodivosti jsou způsobeny přítomností uhlovodíků, které se dostaly do prostředí únikem z palivových nádrží a potrubí, které spojuje nádrže a budovy. Uhlovodíky se vyznačují daleko nižšími hodnotami vodivosti, než mají okolní horniny a ostatní pórové tekutiny. Únik uhlovodíků (typický zápach, olejové skvrny) potvrdily dvě vykopané jámy v severovýchodní části zkoumaného území. Naopak zvýšené vodivostní anomálie jsou zapříčiněné pohřbenými kovovými objekty, které se projeví také zvýšenými hodnotami měřené inphase složky.



Obr. č. 9: (A) Výsledky průzkumu uskutečněného před obdobím tání. (B) Výsledky průzkumu uskutečněného během období tání.

Upraveno podle Pettersson & Nobes 2003.

⁸ starší varianta konduktometru EM-31MK2

4. Testovací měření konduktometrem CMD

4.1. Cíle měření

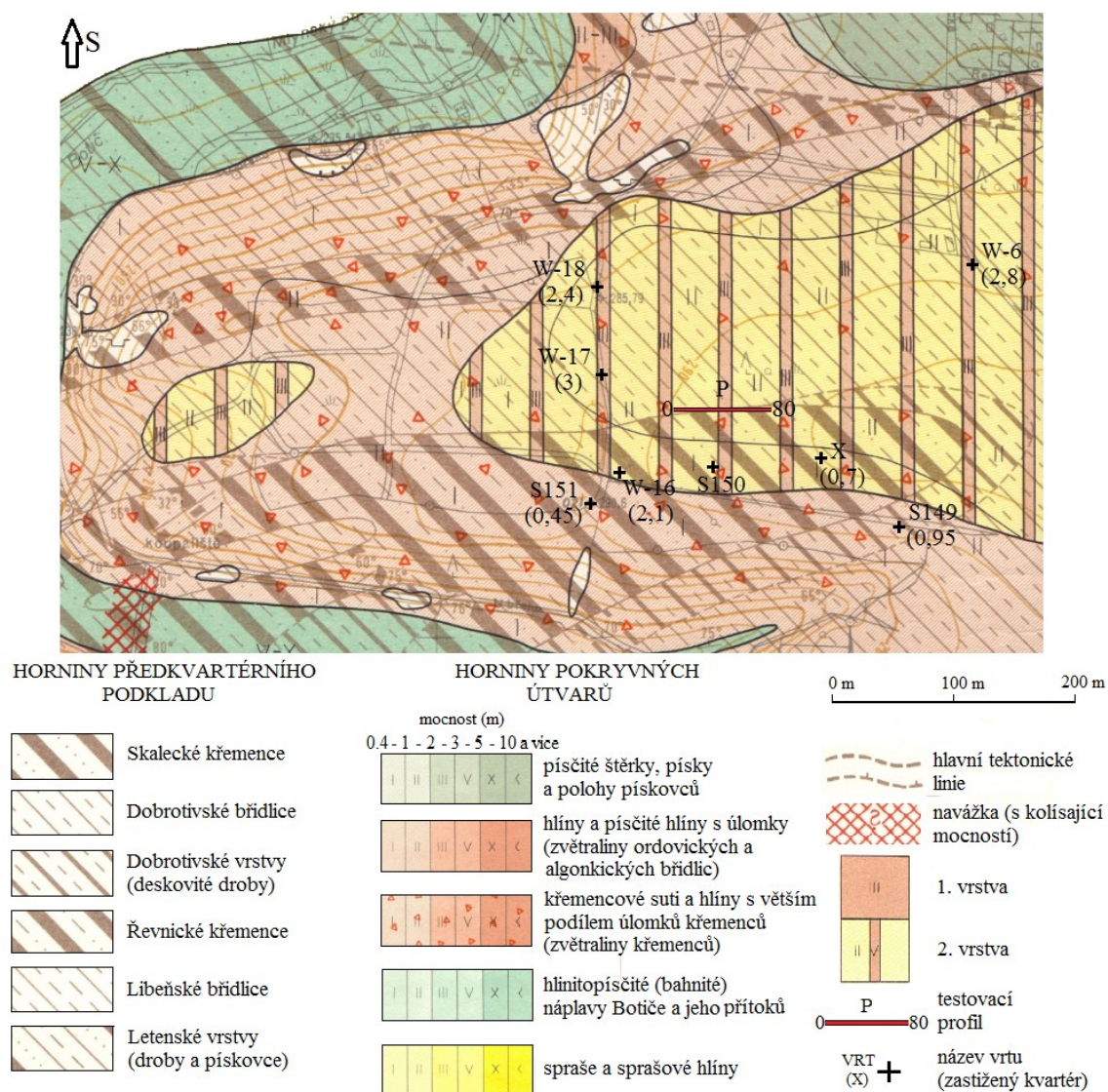
Podnětem pro tuto část práce bylo zakoupení nového konduktometru třídy CMD vyrobeného společností GF Instruments s.r.o., který na Ústavu hydrogeologie, inženýrské geologie a užití geofyziky nahradil starší konduktometr CM-031. Aparatura CM-031 byla vybavena jedním párem cívek vzdálených 3.66 m a s hloubkovým dosahem kolem 5 metrů. Výrazným nedostatkem tohoto přístroje byla jeho nestabilita, projevující se změnou citlivosti v čase, a to nejen po jeho zapnutí, ale při opakovaných měřeních s delším časovým odstupem. V důsledku této skutečnosti docházelo nejen k nárůstu chyby měření, ale někdy i výrazným hladinovým posunům v hodnotách naměřených na stejném profilu po delší časové prodlevě.

Na základě zkušeností s tímto přístrojem se zrodila myšlenka na uskutečnění testovacího měření, které by ověřilo stabilitu nového přístroje. Prvním krokem bylo nalezení vhodného profilu, který by přetínal kontakt hornin o různých odporech, a na tomto profilu poté provést sérii opakovaných měření. Záměrem testování bylo proměřit tento profil všemi konfiguracemi, které tato aparatura umožňuje, v několika různých časových intervalech a při rozdílných podmínkách (zvláště teplotních).

Měření bylo proto rozvrhnuto do několika termínů (dnů i hodin) s cílem získat více kompletních souborů dat. V rámci zpracování naměřených hodnot byly použity jednoduché statistické metody. Cílem bylo zjistit, zda při opakovaných měřeních dochází ke změnám v naměřených hodnotách, případně stanovit míru této změny a určit, zda se hodnoty mění náhodně, či systematicky. Současně byl definován opravný koeficient, umožňující zavedení opravy na systematické posuny. Výsledková část práce obsahuje geologickou interpretaci naměřených dat a analýzu stability použité aparatury z hlediska opakovaných měření a částečně i z hlediska teploty.

4.2. Geologická charakteristika lokality Hostivař – Kozinec

Zájmová lokalita se nachází v jihovýchodní části Prahy, na území rozlehlého přírodního parku Hostivař - Záběhlice. Testovací profil je situován v Hostivařském lesoparku severně od vodní nádrže, a to v západní části návrší Kozinec. Umístění profilu je znázorněno na obr. č. 10:



Obr. č. 10: Výřez z podrobné inženýrsko-geologické mapy 1:5000, list Praha 4-4 (1968)

Zdroj: Archiv Ústavu hydrogeologie, inženýrské geologie a užití geofyziky PrF UK

Zájmové území spadá z regionálně geologického hlediska do prostoru Pražské pánve a je součástí východního křídla Barrandienu. Pražskou pánev tvoří synklinální

struktura se složitým vnitřním členěním, ve které vystupují lokální antiklinály, synklinály a zlomové struktury různých směrů. Zájmová oblast se nachází v jižním křídle lokální antiklinály, kterou tvoří sedimenty ordovického stáří. V jejím jádru vystupují dobrotivské břidlice a v bocích mladší řevnické křemenné pískovce (křemence). Tyto pískovce mají bělošedou barvu a místy obsahují břidličné vložky, břidlice jsou černošedé barvy, jemnozrnné a se slabou siltovou příměsí. Z geomorfologického pohledu se jedná o prostor jádra meandru, který vznikl působením říčky Botič. Skalní podklad téměř celého prostoru meandru Botiče tvoří horniny ordovického stáří, a to především různé typy břidlic stupně beroun (Havránek 2009).

Pokryv je malé mocnosti a je tvořen především hlinitokamenitými eluviálními sedimenty, tj. zvětralinami podložních břidlic a křemenců. Lokálně se na území Kozince nacházejí i sprašové hlíny a spraše, které zde vytvářejí menší enklávy. V blízkosti profilu se nachází několik mělkých vrtů (viz obr. č. 10), ve kterých bylo skalní podloží v hloubkách od 0,5 do 3 metrů. Nejblíže je vrt S150 hluboký 0,9 m, ve kterém však skalní podloží zastíženo nebylo, dále vrt X, u kterého je uvedena mocnost pokryvu 0,7 m, a vrt W-16 se zastížným podložím v hloubce 2,1 m.

Měrný odpor dobrotivských břidlic, nacházejících se v oblasti Velké Prahy, se nejčastěji pohybuje v prvních desítkách Ωm s limitem do 60 Ωm . Měrný odpor spraší se nejčastěji pohybuje v rozmezí 10 až 30 Ωm (Dohnal – osobní konzultace) a měrný odpor křemenných pískovců v rozmezí 10^3 až 10^5 Ωm (Mareš et al. 1990).

V 6. až 5. století před naším letopočtem byla západní část ostrožny Kozince využita jako strategicky významné místo pro vybudování a fungování výšinného hradiště. Po jeho zániku byl prostor významněji znovu osídlen až v raném středověku (8. a 9. století n. l.). Staré sídelní aktivity dokládají dodnes zachované pozůstatky fortifikačního systému – zejména částečně aplanovaný hlinitokamenitý val na východě a další menší části opevnění po obvodu hradiště – především na severu a jihu.

4.3. Metodika měření a použitá aparatura

Měření bylo realizováno konduktometrem CMD v obou vyráběných variantách, tj. ve verzi *CMD-Explorer* pro větší hloubky a ve verzi *CMD-MiniExplorer* pro menší hloubky. Vysílací a přijímací část přístroje *CMD-Explorer* se skládá ze tří párů vysílacích a přijímacích cívek umístěných v kompaktním tubusu. Různé vzdálenosti příslušných párů vysílačů a přijímačů umožňují simultánní měření vodivosti ve třech různých hloubkových úrovních. Tubus s cívkami je přes 4 metry dlouhý a váží 8 kg, pro lepší manipulaci se proto využívá zavěšení systému do postroje, který je fixován na záda, a měří se ve výšce cca 1 metr nad povrchem terénu. *CMD-MiniExplorer* (obr. č. 11) je zmenšenou verzí *Exploreru*, obsahuje tedy stejný počet cívek, ale hloubkový dosah přístroje je menší. Při měření je sonda položena na zemi a pro usnadnění manipulace je připojena na tyčový držák. Menší rozměry a hmotnost zajišťují snadnější přesun s přístrojem podél profilu. Vzdálenosti jednotlivých párů cívek a jim odpovídající efektivní hloubkové dosahy jsou uvedeny v tabulce č. 2.

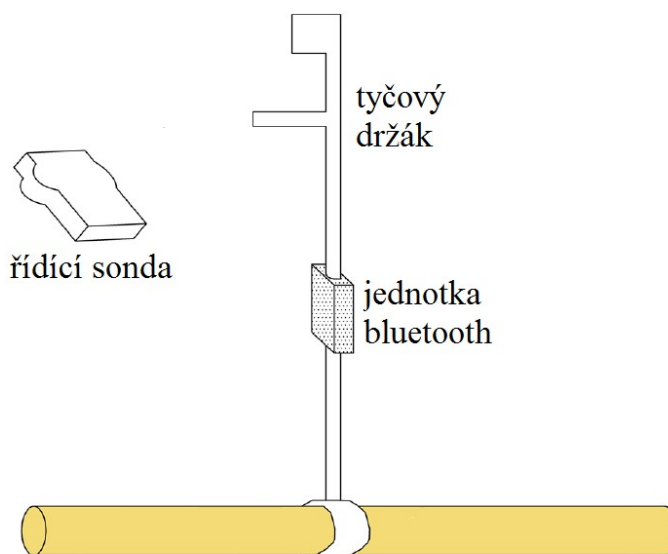
Pro účely této práce byl zvolen testovací profil orientovaný ve směru západ - východ, jehož délka činila 80 metrů. Jednotlivé měřicí body byly od sebe vzdálené 2 metry, jeden kompletní proměřený soubor obsahoval 41 měřících bodů. Přesná pozice bodů byla zajištěna dvěma padesátimetrovými pásmy nataženými mezi krajními body profilu, které byly fixovány pomocí dřevěných kolíků. Povrch byl terénu v rámci profilu rovinný a pokryt travnatým porostem.

Celé terénní měření proběhlo ve třech termínech. První etapa se realizovala 26.5.2014. Kvůli nepřízní počasí a dalším okolnostem nebylo možné v měření pokračovat následující dny, další sběr dat se pak uskutečnil až 10. a 11.6.2014.

Podle úhlu natočení sondy vzhledem k linii profilu a podle orientace cívek se lze s aparaturou podél profilu pohybovat čtyřmi způsoby. Ve vertikálním módu je možné měřit se systémem orientovaným kolmo nebo podél profilu; analogicky i v módu horizontálním. Dohromady pro obě sondy (dlouhou i krátkou) tak existuje 8 použitelných kombinací.

V prvním termínu se podařilo z důvodu předběžného vybírání vhodného místa pro situování profilu proměřit jen 6 kombinací, v druhém všechny kombinace třikrát a v posledním termínu všechny kombinace dvakrát. Během měření v druhém a třetím termínu byla pravidelně zapisována teplota. Průběh teploty v první fázi měření byl

aproximován teplotními hodnotami z nejbližší meteorologické stanice ČHMÚ v Průhonicích.



Obr. č. 11: Zjednodušené schéma konduktometru *CMD-MiniExplorer*.
Zdroj: Upraveno podle Bonsall et al. 2013

4.4. Zpracování naměřených dat

Naměřená data se průběžně ukládají do uživatelem pojmenovaných souborů ve vnitřní paměti řídicí jednotky (128 Mb), která je u *CMD-Explorer* propojena přímo s měřicím systémem, zatímco v případě *CMD-MiniExplorer* je komunikace zajištěna bezdrátově (bluetooth). Při následném přenosu do počítače má uživatel možnost převést tyto data z uložených binárních souborů (.bln) do datových souborů (.dat). V nich je zaznamenána x-ová a y-ová souřadnice měřených bodů a jim odpovídající hodnoty měrné zdánlivé vodivosti (v mS/m) a inphase složky (v ppt) ze tří hloubkových úrovní. Tyto hodnoty doplňují na každém bodě ještě výsledky 1D inverze a přístrojem vypočítané chyby měření.

Výsledky jednotlivých měření ze třech termínů tvořilo 46 souborů. Prvním krokem zpracování bylo proto uspořádání všech dat do jednoho souboru, což poté umožnilo snadnější aplikaci hromadných úprav. Pro tyto účely byl použit program Microsoft Office Excel 2007. První hromadnou úpravou bylo převedení hodnot zdánlivé měrné vodivosti v mS/m na hodnoty zdánlivého měrného odporu v Ωm (Ohmmetr).

V naměřených datech se místy objevily nelogické záporné hodnoty a také hodnoty, které extrémně vybočují z naměřených trendů (tzv. „spikes“). Výskyt

záporných hodnot vyplývá ze skutečnosti, že výsledné parametry jsou měřeny nepřímou, a to na základě vztahů, které jsou odvozeny za konkrétních kalibračních podmínek. V okamžiku, kdy dojde k porušení těchto podmínek, odezva přístroje je neadekvátní a ten indikuje nereálné hodnoty. Je známo, že konduktometry mohou vykazovat záporné hodnoty vodivosti v blízkosti extrémně vodivých lineárních nehomogenit, jako jsou kovové trubky apod. (Everett 2013). Přítomnost těchto objektů by se však v měření projevila především anomáliemi vyšší vodivosti a zvýšenými hodnotami inphase složky, a to výsledky měření neukazují.

Pro zachování plného rozsahu 41 hodnot pro všechny soubory byla sporadická chybná čtení odstraněna a místo nich byly použity hodnoty rekonstruované pomocí takzvaných opravných koeficientů. Každý bod profilu byl proměřen všemi kombinacemi 5 až 6krát. Z těchto naměřených hodnot byl pro každou konfiguraci, pro každý bod a pro každý hloubkový dosah spočítán průměr, přičemž záporné a „spike“ hodnoty byly z tohoto výpočtu vynechány. Každá řadová naměřená hodnota byla poté normována (vydělena) odpovídajícím průměrem. Zprůměrováním těchto hodnot (41 bodů) zvlášť pro každou konfiguraci a každý hloubkový dosah byl vyčíslen bezrozměrný parametr (tzv. opravný koeficient), který charakterizuje, jak se příslušné konkrétní měření liší od průměrného (ideálního) měření. Hodnoty, které byly z výpočtů z výše uvedených důvodů vyřazeny, byly pak nahrazeny součinem průměrné hodnoty a příslušného opravného koeficientu.

Další krok zpracovávání dat byl zaměřen na určení míry změny naměřených hodnot v čase. Pro tento účel byl vždy na šestici (či pěti) stejných (stejných ve smyslu naměřených na stejném bodě stejnou konfigurací) hodnot aplikován vzorec pro výběrovou směrodatnou odchylku s_x :

$$s_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}, \quad (4.4.1)$$

kde x_i je naměřená hodnota, \bar{x} je průměr z naměřených hodnot a n je jejich počet (Čmelík et al. 2001). Výsledek byl ještě normován průměrnou hodnotou a vynásoben stem, aby odchylka vycházela v relativních jednotkách (%). Tyto výsledné hodnoty budeme označovat jako chyby měření.

Na základě opravných koeficientů byla nakonec zavedena oprava, která vede ke zmenšení odchylky naměřených hodnot od průměru. Tato oprava byla realizována vydělením naměřených hodnot příslušným koeficientem.

4.5. Geologická interpretace výsledků měření

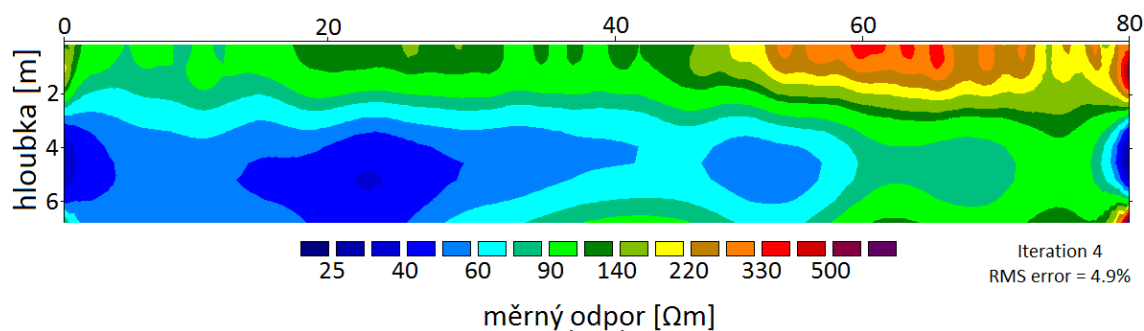
Výstupy testovacího měření pro geologickou část interpretace mají formu grafů zdánlivého měrného odporu v závislosti na metráži (grafy byly zhotoveny v programu Grapher 10 společnosti Golden Software). V grafech jsou použity zprůměrované hodnoty po zavedení opravy, a to při orientaci přístroje paralelně s profilem. V každém z grafů je znázorněna odezva horizontálního a vertikálního módu přístroje pro jednu vzdálenost vysílače a přijímače. Dohromady se jedná o šest grafů, tři pro krátkou a tři pro dlouhou sondu (viz obr. č. 12).

Ve výsledných grafech pro dlouhou sondu pozorujeme pro všechny hloubkové úrovně (ρ_{z1} , ρ_{z2} , ρ_{z3}) podobný trend. Zhruba do poloviny profilu směrem od západu hodnoty odporů nevykazují velké změny a pohybují se od 50 do 80 Ωm . Přibližně od metráže 40 se odpory začínají výrazněji měnit a dochází k jejich postupnému nárůstu až k hodnotám kolem 130 až 180 Ωm . Odpory převládající v první polovině profilu odpovídají ordovickým břidlicím a zvětšování odporů od poloviny profilu lze vysvětlit postupným zvyšováním podílu křemencových vložek.

Výsledky pro krátkou sondu vykazují podobný trend. Zajímavý je téměř identický průběh odezvy horizontálního a vertikálního módu v západní polovině profilu (do metráže 44) pro ρ_{z2} a ρ_{z3} , z něhož vyplývá, že pokryv se v této části profilu s hloubkou moc nemění. Ve východní části profilu se hodnoty opět postupně zvyšují, což může být způsobeno přítomností větších úlomků křemenců v pokryvu. Odezva vertikálního módu je v této části profilu vždy nadsazená nad odezvou horizontálního módu. To naznačuje nárůst odporu, a tedy i zvyšování podílu úlomků křemenců, s hloubkou.

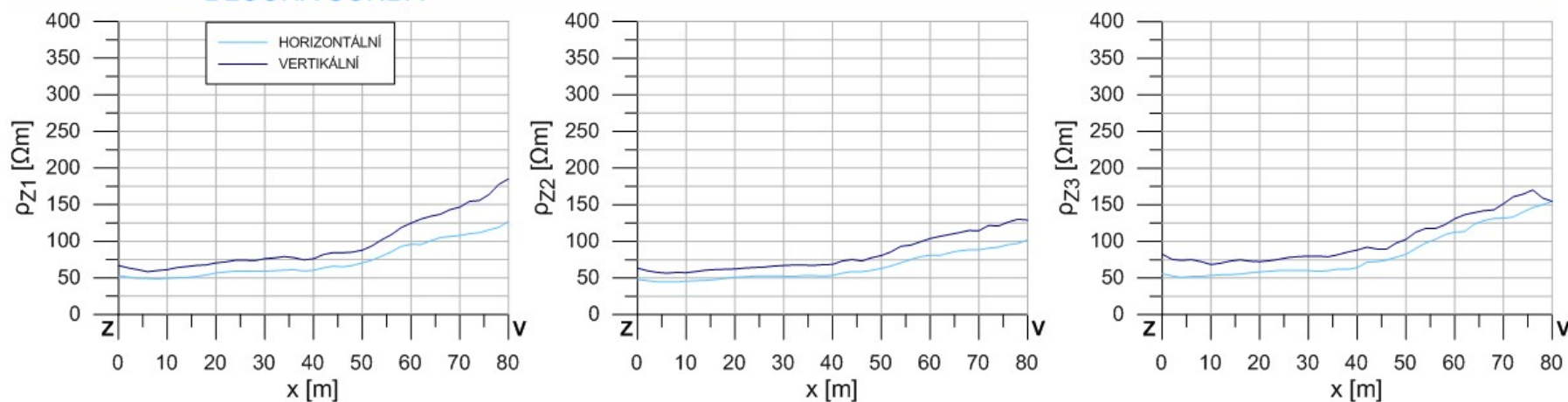
Software pro přenos dat umožňuje také převedení datového souboru do formátu kompatibilního pro vstup do inverzního programu RES2DINV. Pro vizualizaci výstupu bylo této možnosti využito a výsledek inverze je uveden na obr. č. 2. Vstupními údaji pro inverzi byly zprůměrované hodnoty zdánlivého měrného odporu (po zavedení opravy) naměřené dlouhou sondou orientovanou paralelně s profilem. Výsledný řez

dokládá přítomnost výrazně nevodivého pokryvu ve východní části profilu. V západní části je pokryv vodivější, zvětraliny křemenců jsou zde zastoupeny v menší míře a případně i překryty sprašemi, jak naznačuje inženýrsko-geologická mapa na obr. č. 10.

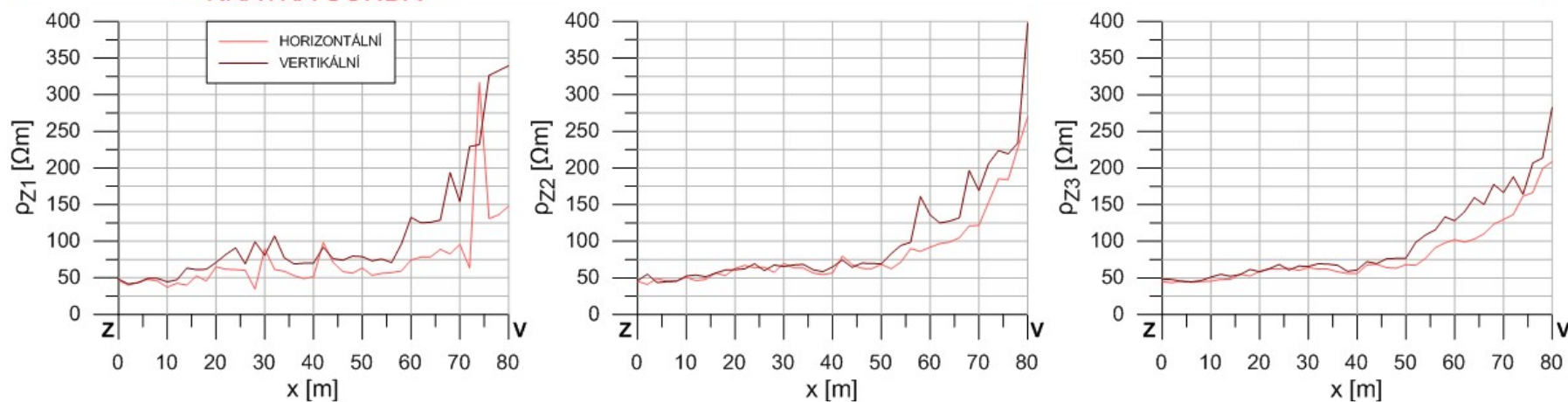


Obr. č. 13: Odporový řez v linii testovacího profilu. Pro lepší rozlišení výstupu bylo nastaveno dvojnásobné hloubkové převýšení.

DLOUHÁ SONDA



KRÁTKÁ SONDA






Obr. č. 12: Zdánlivé měrné odpory v závislosti na pozici na profilu.
 ρ_{z1} – nejmenší hloubkový dosah, ρ_{z2} – střední hloubkový dosah, ρ_{z3} – největší hloubkový dosah

4.6. Vyhodnocení testovacího měření

Vypočítané chyby měření lze hodnotit za prvé, s ohledem na hloubkový dosah dané konfigurace měření a za druhé, z hlediska rozložení naměřených odporů podél profilu. Aby bylo možné hodnotit chyby podle prvního jmenovaného hlediska, bylo třeba hodnoty chyb z jednotlivých bodů nějakým způsobem zprůměrovat. To bylo provedeno úpravou vzorce (4.4.1), ve kterém se počet kvadrátů v čitateli rozšířil na n (počet opakovaných měření na jednom bodě) krát $4l$ (počet bodů na profilu) a analogicky došlo ke změně ve jmenovateli, který byl upraven na $4l(n-1)$ (Ježek – osobní konzultace). Hodnoty těchto „průměrných“ chyb jsou zachyceny v tab. č. 3. Pro doložení efektu korekce jsou v tabulce uvedeny i „průměrné“ chyby pro data, která byla opravena pomocí výše uvedených koeficientů.

DLOUHÁ SONDA												
mód orientace k profilu hloubková úroveň	vertikální kolmo			vertikální podél			horizontální kolmo			horizontální podél		
	ρ_{z1}	ρ_{z2}	ρ_{z3}	ρ_{z1}	ρ_{z2}	ρ_{z3}	ρ_{z1}	ρ_{z2}	ρ_{z3}	ρ_{z1}	ρ_{z2}	ρ_{z3}
	ρ_{z1}	ρ_{z2}	ρ_{z3}	ρ_{z1}	ρ_{z2}	ρ_{z3}	ρ_{z1}	ρ_{z2}	ρ_{z3}	ρ_{z1}	ρ_{z2}	ρ_{z3}
„průměrná“ chyba [%]	24,4	5,5	2,3	10,7	3,4	2,3	11,8	4,5	4,3	9,1	4,4	5,4
„průměrná“ chyba po korekci [%]	9,7	1,9	1,3	3,5	1,3	1,5	3,5	2,1	2,3	3,8	2,6	3,8

KRÁTKÁ SONDA												
mód orientace k profilu hloubková úroveň	vertikální kolmo			vertikální podél			horizontální kolmo			horizontální podél		
	ρ_{z1}	ρ_{z2}	ρ_{z3}	ρ_{z1}	ρ_{z2}	ρ_{z3}	ρ_{z1}	ρ_{z2}	ρ_{z3}	ρ_{z1}	ρ_{z2}	ρ_{z3}
	ρ_{z1}	ρ_{z2}	ρ_{z3}	ρ_{z1}	ρ_{z2}	ρ_{z3}	ρ_{z1}	ρ_{z2}	ρ_{z3}	ρ_{z1}	ρ_{z2}	ρ_{z3}
„průměrná“ chyba [%]	20,6	10,8	5,8	22,8	9,4	4,2	16,8	9,2	5,4	17,8	5,5	3,0
„průměrná“ chyba po korekci [%]	14,0	7,6	3,7	16,9	7,6	3,7	13,8	6,7	3,4	16,0	4,5	2,5
	 < 8,1%			 8,1–16,2%			 > 16,2%					

Tab. č. 3: Zobrazení „průměrných“ chyb měření pro všechny použité kombinace a hloubkové úrovně. Barevná škála zdůrazňuje rozdíly mezi výslednými hodnotami.

Z předložených výsledků lze vyčíst, že hodnoty chyb klesají s rostoucím hloubkovým dosahem obou použitých sond. Nejvyšší chyby odpovídají měření s nejmenším hloubkovým dosahem (ρ_{z1}), zatímco pro největší hloubkový dosah (ρ_{z3}) platí ve většině případů přesný opak (až na odezvu dlouhé sondy v horizontálním módu ve směru podél profilu). Tyto skutečnosti vyplývají z následujících faktů.

Pro každou vzdálenost cívek a použitý mód je objem prostředí, do kterého proniká elektromagnetické pole, vždy jiný. Pro velké rozestupy cívek je objem několikrát větší ve srovnání s objemem odpovídajícím menším rozestupům. Zároveň je prakticky nemožné, abychom na jednom bodě měřili pokaždé přesně identický objem prostředí. I malý posun přístroje vzhledem k testovacímu profilu, ať už se jedná o změnu úhlu mezi směrem profilu a osou přístroje, nebo o vychýlení pozice z bodu měření, může znamenat změnu v příslušném objemu. A pokud se v této změně objemu nachází nějaká vodivostní heterogenita, která předtím zastižená nebyla, pak se projeví i změnou v naměřené vodivosti. Důvod, proč je chyba větší pro menší hloubkový dosah, spočívá v tom, že relativní velikost hypotetické heterogenity je větší v poměru ke zkoumanému objemu prostředí při malém hloubkovém dosahu, ale zároveň menší vzhledem k objemu zkoumanému při velkém dosahu. Ve větším měřeném objemu se tedy taková heterogenita projeví relativně méně. To potvrzuje i to, že u krátké sondy jsou vypočítané chyby měření zpravidla větší, než u dlouhé sondy.

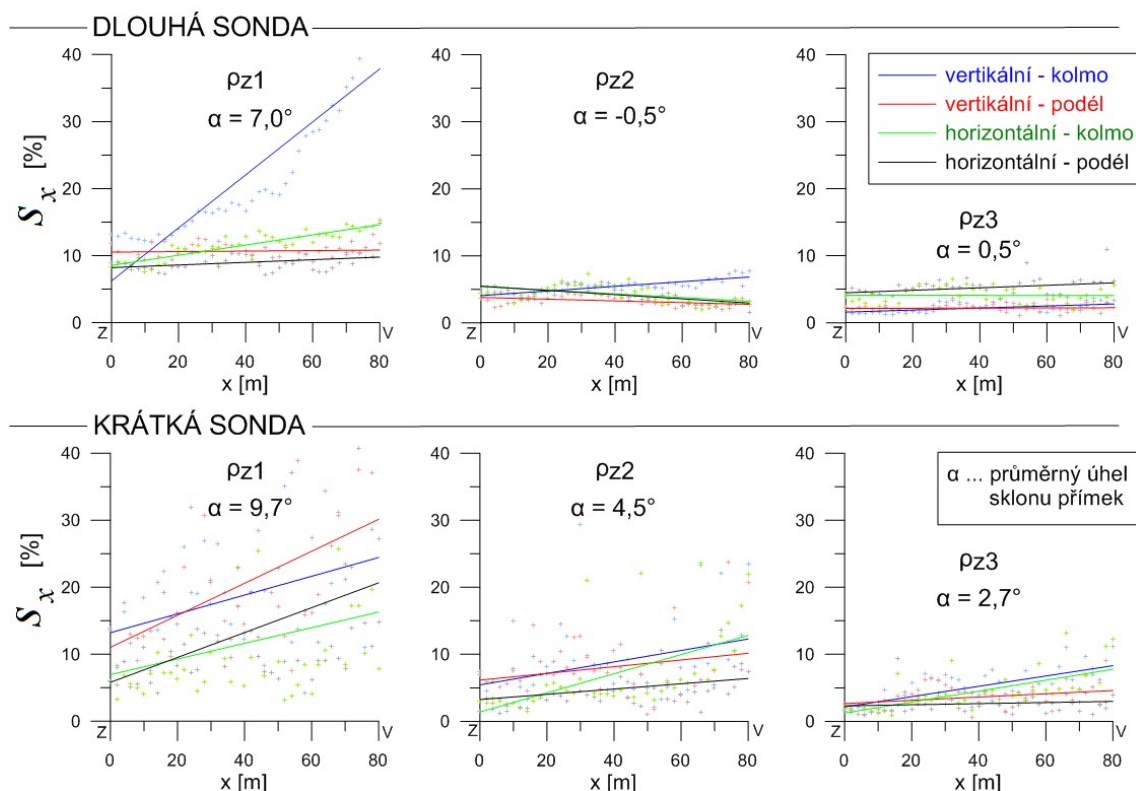
Na velikosti zjištěné chyby měření se podílí i fakt, že měření bylo rozděleno do tří termínů. To může ovlivnit opět především malé hloubkové dosahy, protože pokud dojde k nějakým změnám ve vlastnostech prostředí mezi jednotlivými termíny (např. zvýšení vlhkosti v důsledku srážek apod.), pak se tyto změny projeví především v malých hloubkách pod povrchem.

Pro hodnocení chyb z hlediska rozložení naměřených zdánlivých měrných odporů podél profilu byly vyneseny do grafů hodnoty chyb, vypočítané pomocí vzorce (4.4.1), v závislosti na pozici bodu měření na profilu, a to pro obě sondy a všechny hloubkové úrovně zvlášť (obr. č. 14). Těmito hodnotami byla pro každou kombinaci proložena přímka metodou lineární regrese (tzn. 4 přímky na jeden graf). Ze směrnic přímek byl vyčíslen jejich úhel sklonu.

Grafy ukazují, že chyby měření nabývají větších hodnot vesměs v té části profilu, kde byl naměřen vyšší odpor a naopak menších hodnot tam, kde jsou naměřené

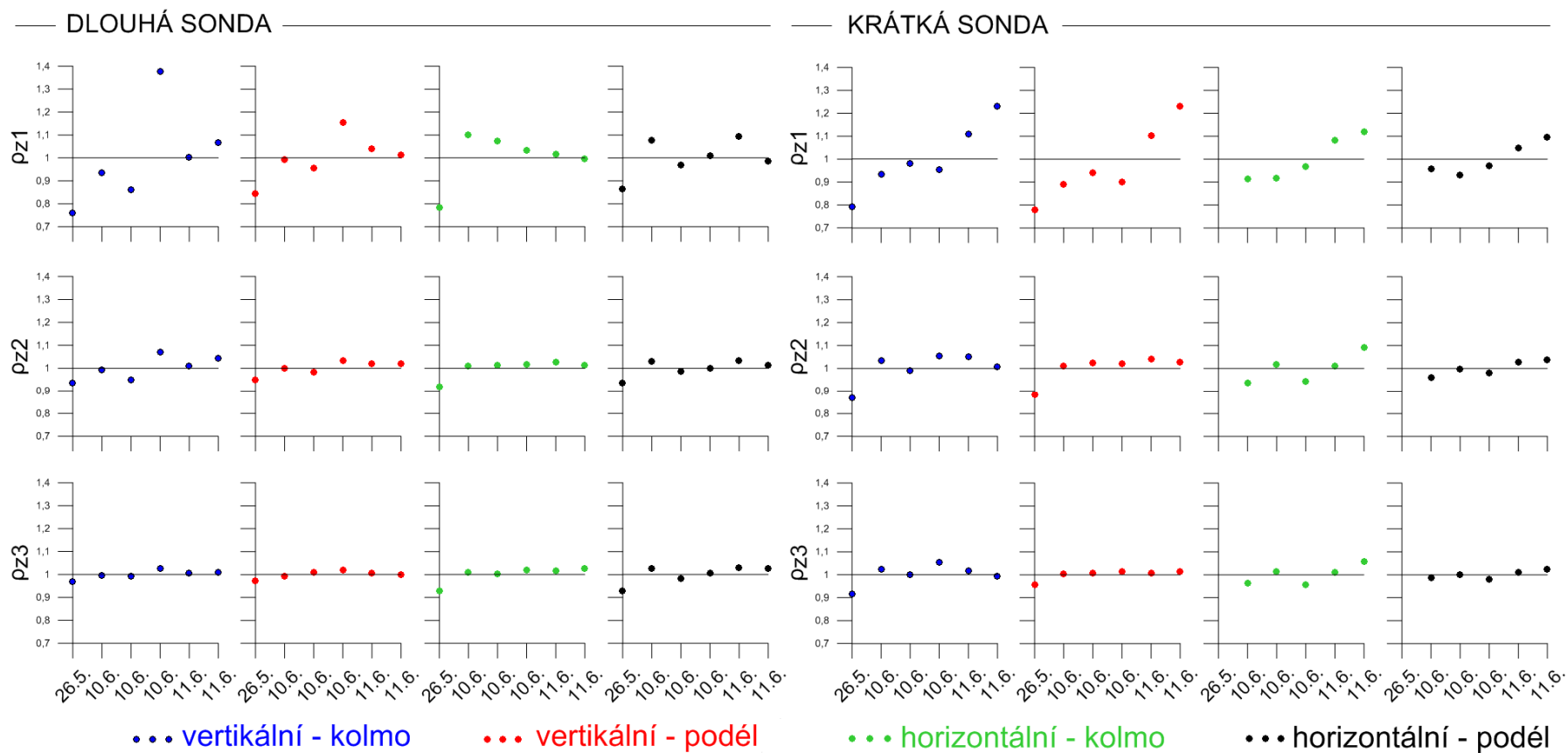
odpory nižší. Čím je větší úhel sklonu přímky, tím je větší také rozdíl v chybách v těchto dvou částech profilu. Uvedený trend je nejzřetelnější u krátké sondy a u malých hloubkových dosahů, u kterých byly naměřeny generelně větší odpory. U hloubkových dosahů ρ_{z2} a ρ_{z3} dlouhé sondy se tento trend projevil velmi málo nebo vůbec ne ($\alpha = -0,5^\circ, \alpha = 0,5^\circ$), což je pravděpodobně dáno pozvolnějším nárůstem hodnot odporů, než u zbylých hloubkových dosahů (viz obr. č. 12).

Zdá se tedy, že existuje určitá závislost chyby měření na velikosti odporu zkoumaného prostředí.



Obr. č. 14: Graf výběrových směrodatných odchylek v závislosti na pozici bodu měření. V legendě v pravém horním rohu je uveden použitý mód a orientace přístroje k profilu

Ve výše uvedených chybách jsou všechna měření v rámci jednotlivých termínů brána se stejnou vahou a informaci o tom, jak se jednotlivá měření v konkrétních konfiguracích mění s časem (v rámci všech tří termínů) z nich nelze získat. Pro zjištění a zobrazení této informace lze ale využít již dříve zavedených zprůměrovaných opravných koeficientů. Jednotlivé koeficienty pro všechny hloubkové dosahy a všechny konfigurace v závislosti na termínu měření jsou zobrazeny na obr. č. 15.



Obr. č. 15: Zprůměrované opravné koeficienty pro všechny konfigurace v závislosti na termínu měření. Termíny jsou seřazeny chronologicky, zleva doprava.

Změny v koeficientech jsou podmíněny různými faktory, které nelze navzájem oddělit, a každý z nich může mít na změnu koeficientu různý dopad. Jedním z těchto faktorů je teplota.

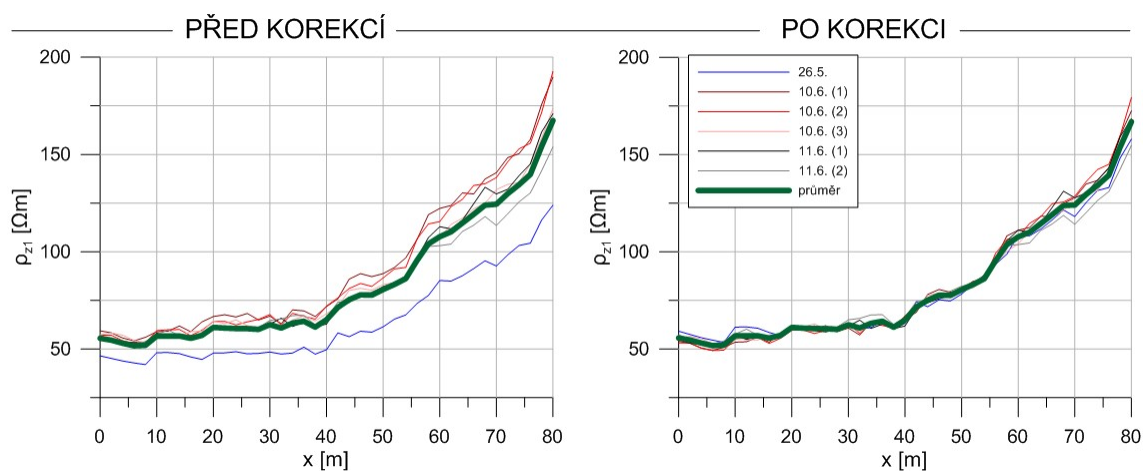
V rámci každého termínu teplota s časem vždy kontinuálně rostla. Průměrná teplota během prvního termínu byla 22,4°C (21,7°C až 22,9°C), během druhého 26,0°C (25,2°C až 27,5°C) a během posledního 25,7°C (24,9°C až 26,7°C). Kdyby vzrůstající teplota měla za následek systematickou změnu v měřených hodnotách, projevilo by se to stoupajícím (nebo klesajícím) trendem hodnot koeficientů v rámci jednoho termínu. Žádný takový trend z výsledků patrný není, a teplota tak buď na změnu citlivosti přístroje nepůsobí, nebo v rámci menších teplotních změn působí jen velmi subtilně a ve výsledku se neprojeví.

Obecným cílem bylo zjistit, jestli se ve změnách koeficientů v rámci časové sekvence měření vyskytuje nějaký systematický trend. To se nepotvrdilo, rozložení koeficientů se zdá být náhodné. Z hlediska hloubkových dosahů tato analýza pomocí opravných koeficientů potvrzuje výsledky „průměrných“ chyb měření (tab. č. 3). Pro nejmenší hloubkový dosah jsou odchylky koeficientů od referenční hladiny ($\rho_{zX} = 1$) největší a s narůstajícím dosahem se zmenšují.

U dlouhé sondy, za vertikálního módu a při orientaci osy přístroje kolmo k profilu, je pořadově čtvrté měření (2. termín, poslední série) zřetelně ovlivněno změnou citlivosti (neznámé příčiny), která způsobila v nejmenším hloubkovém dosahu naměření téměř dvojnásobných zdánlivých měrných odporů v té části profilu, kde se vyskytují vysoké odpory. Tato změna citlivosti má za následek také velkou „průměrnou“ chybu měření (viz tab. č. 3) i velký sklon přímky proložené hodnotami odchylek (viz obr. č. 14).

Systematické chyby lze zmenšit zavedením korekce na primární data. Pro takto opravená data byly znovu spočteny chyby měření. Porovnání chyb před a po korekci je uvedeno v tab. č. 3 a pro jeden konkrétní případ i na obr. č. 16. Zavedením opravy se „průměrná“ chyba měření zmenšila pro všechny hloubkové dosahy.

S ohledem na uvedené faktory se nutnost opravy zdá být potřebná především pro měření s krátkou sondou.



Obr. č. 16: Zobrazení primárních dat a dat po korekci pro dlouhou sondu, horizontální mód a kolmou orientaci aparatury k profilu

5. Závěr

Konduktometrie se v geofyzikální praxi využívá už více jak 30 let a za tuto dobu našla uplatnění v různých, nejen geologicky orientovaných, oborech. Rychlost provedení průzkumu a dobré rozlišení grafických výstupů z ní činí oblíbený nástroj při pozemních průzkumech. Nové aparatury navíc umožňují sondování pro několik hloubkových úrovní najednou a poskytují tak jakousi alternativu pro klasické odporové metody. Při interpretaci naměřených dat je důležité rozumět základním principům této metody, umět rozlišit typické zdroje anomálií a vědět, jaké okolnosti mohou měření ovlivnit.

Testovaná aparatura má v obou sondách zabudované tři přijímací cívky. Tři různé vzdálenosti od vysílací cívky umožňují měření ve třech hloubkových úrovních. Testovací měření prokázalo, že každý z těchto hloubkových dosahů vykazuje různou hladinu chyb. Největší chyby měření se vyskytují u dat získaných měření s nejkratším párem cívek. Celkově jsou chyby vyšší u krátké sondy než u dlouhé. Chyby lze redukovat využitím opěrného profilu, na kterém se v určitých časových intervalech měření opakuje, a pomocí údajů naměřených na tomto profilu se následně provede korekce dat.

Během testovacího měření nedocházelo k výrazným teplotním změnám a v naměřených hodnotách se neprojevil žádný teplotní drift. Pro zkoušku stability přístroje by určitě byl zajímavější větší rozptyl teplot, který se ale bohužel nepodařilo zastihnout. Přesnost naměřených hodnot by bylo možné zhodnotit i srovnáním s libovolnou stejnosměrnou odporovou metodou, jako je např. VES nebo multielektrodová metoda.

Celkově se testovaný konduktometr jeví stabilní a poskytuje tedy důvěryhodné informace o odporových vlastnostech geologického prostředí.

6. Použitá literatura

- Benavides I, A., & Everett, M. E. (2005). Target signal enhancement in near-surface controlled-source electromagnetic data. *Geophysics*, 70(3), pp. 59-67.
- Bonsall, J., Fry, R., Gaffney, C., Armit, I., Beck, A., & Gaffney, V. (2013). Assessment of the CMD Mini-Explorer, a New Low-frequency Multi-coil Electromagnetic Device, for Archaeological Investigations. *Archaeological Prospection*, 20(3), pp. 219-231.
- Burger, H., Sheehan, A., & Jones, C. (2006). *Introduction to applied geophysics: exploring the shallow subsurface*. (xxii, 554 p., A 46). New York: W.W. Norton.
- Carpenter, P. J., & Ahmed, S. (2002). Detecting preferential infiltration pathways in soils using geophysics. *The Leading Edge*, 21(5), pp. 471-473.
- Čmelík, M., Machonský, L., & Burianová, L. (2001). *Úvod do fyzikálních měření*. (2nd ed., 80 p.) TUL.
- Doolittle, J. A., & Brevik, E. C. (2014). The use of electromagnetic induction techniques in soils studies. *Geoderma*, 223, pp. 33-45.
- Everett, M. E. (2013). *Near-surface applied geophysics*. (403 p.) Cambridge University Press.
- Godio, A., Sambuelli, L., & Socco, L. V. (2000). Electromagnetic survey for detection of archaeological remains in urban sites. *The Leading Edge*, 19(8), pp. 850-854.
- Gore, D. A., & Olyphant, G. A., (2010). Mapping the variability of groundwater quality in an abandoned tailings deposit using electromagnetic geophysical techniques. In: Barnhisel, R.I., ed., *Proceedings of the 2010 National Meeting of the Society of Mining and Reclamation, Bridging Reclamation Science and the Community, June 5-11, 2010, Pittsburgh, Pennsylvania*, pp. 403-414.
- Karous, M. (1989). *Geoelektrické metody průzkumu*. (423 p.) Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury.
- Kearey, P., Brooks, M., & Hill, I. (2002). *An introduction to geophysical exploration*. (3rd ed., viii, 262 p.) Malden: Blackwell.
- Kobr, M. (1997). *Petrofyzika*. (1st ed., 134 p.) Praha: Karolinum.
- Lowrie, W. (2007). *Fundamentals of geophysics*. (2nd ed., x, 381 p.) Cambridge: Cambridge University Press.
- Mareš, S. (1990). *Úvod do užité geofyziky*. (2nd ed., 677 p.) Praha: SNTL.
- Mazáč, O., Mareš, S., & Kelly, W. (1997). *Applied geophysics in environmental engineering and science*. (1st ed., 98 p.) Praha: Karolinum.
- McNeill, J. D. (1980). Electromagnetic terrain conductivity measurement at low induction numbers: Technical Note TN-6: Geonics Limited, Mississauga, Ontario

Pettersson, J. K., & Nobes, D. C. (2003). Environmental geophysics at Scott Base: ground penetrating radar and electromagnetic induction as tools for mapping contaminated ground at Antarctic research bases. *Cold regions science and technology*, 37(2), pp. 187-195.

Reynolds, J. (2011). *An introduction to applied and environmental geophysics*. (2nd ed., xii, 696 p.) Chichester: Wiley-Blackwell.

Shaohong, Z. (2010). Delineation of groundwater and soil contamination using EM survey at an industrial abandoned site. In: *Bioinformatics and Biomedical Engineering (iCBBE), 2010 4th International Conference on* (pp. 1-4). IEEE.

Sharma, P. (1997). *Environmental and engineering geophysics*. (1st publ., 475 p.) Cambridge: Cambridge University Press.

Soupios, P., Papadopoulos, N., Papadopoulos, I., Kouli, M., Vallianatos, F., Sarris, A., & Manios, T. (2007). Application of integrated methods in mapping waste disposal areas. *Environmental geology*, 53(3), pp. 661-675.

Telford, W., Geldart, L., & Sheriff, R. (2001). *Applied geophysics*. (2nd ed., xx, 770 p.) Cambridge: Cambridge University Press.

Zhdanov, M. S. (2010). Electromagnetic geophysics: Notes from the past and the road ahead. *Geophysics*, 75(5), 75A49-75A66.

Internetové zdroje:

Dualem Inc. Oficiální webové stránky společnosti. Dostupné na:
<http://www.dualem.com>

Havránek J. (2009). Plán péče pro přírodní památku Meandr Botiče. Dostupné na
http://envis.prahamesto.cz/planypece_ozchu/PP_MeandrBotice_2010_2020/Plan_pece_PP_MeandrBotice_2010_2020.pdf

Geometrics. Oficiální webové stránky společnosti. Dostupné na:
<http://www.geometrics.com>

Geonics Limited. Oficiální webové stránky společnosti. Dostupné na:
<http://www.geonics.com>

Geophex, Ltd. Oficiální webové stránky společnosti. Dostupné na:
<http://www.geophex.com>

GF Instruments, s.r.o. Oficiální webové stránky společnosti. Dostupné na:
<http://www.gfinstruments.cz/>

GF Instruments, s.r.o. (2013). Short Guide for electromagnetic conductivity mapping. Dostupné na: http://www.gfinstruments.cz/version_cz/downloads/CMD_Short_guide-2013.pdf

GISCO. Oficiální webové stránky společnosti. Dostupné na: <http://www.giscogeo.com>

Skagafjördur Archaeological Settlement Survey. Webový blog SASS. Dostupný na: <http://blogs.umb.edu/sass/>

Osobní konzultace:

PhDr. RNDr. Jiří Dohnal (23. 7. 2014) – informace týkající se měrných odporů, typických pro spraše a ordovické břidlice

RNDr. Josef Ježek, CSc. (21. 7. 2014) – pomoc při odvození vzorce pro „průměrnou“ chybu měření